

BEST AVAILABLE COPY

A Raman amplifier comprises a pumping light producing means (1) for producing pumping lights. The pumping lights are multiplexed with a signal light propagated through an optical fiber (2) so as to give the signal light a Raman gain. The means (1) is constituted of a semiconductor laser of Fabri-Perot, DFB, or DBR type and an MOPA (3). The center wavelengths of the pumping lights are different from each other, and the intervals between them are 6 nm to 35 nm. An optical repeater provided in an optical fiber transmission line (8) compensates the loss caused by the optical fiber transmission line (8) and includes the Raman amplifier (9) used for the compensation. A Raman amplification method for Raman-amplifying a signal light by sending the signal light and pumping lights having mutually different center wavelengths through an optical fiber serving as a Raman-amplification medium, in which the power of the pumping light having a shorter wavelength is higher.

(57)要約

本発明のラマン増幅器は複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とした。本発明の光中継器は光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器であって、前記ラマン増幅器を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する。本発明のラマン増幅方法は中心波長が異なる2以上の励起光と信号光とをラマン増幅媒体である光ファイバに伝播して、前記信号光をラマン増幅するためのラマン増幅方法において、中心波長が短い励起光ほど光パワーを高くした。

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第一頁に掲載されたPCT加盟国を同定するために使用されるコード(参考情報)

| | | | | | | | |
|----|--------------|----|---------|----|----------------|----|------------|
| AE | アラブ首長国連邦 | DM | ドミニカ | KZ | カザフスタン | RU | ロシア |
| AL | アルバニア | EE | エストニア | LC | セントルシア | SD | スーダン |
| AM | アルメニア | ES | スペイン | LI | リヒテンシュタイン | SE | スウェーデン |
| AT | オーストリア | FI | フィンランド | LK | スリランカ | SG | シンガポール |
| AU | オーストラリア | FR | フランス | LR | リベリア | SI | スロベニア |
| AZ | アゼルバイジャン | GA | ガボン | LS | レソト | SK | スロヴァキア |
| BA | ボスニア・ヘルツェゴビナ | GB | 英国 | LT | リトアニア | SL | シエラ・レオネ |
| BB | バルバドス | GD | グレナダ | LU | ルクセンブルグ | SN | セネガル |
| BE | ベルギー | GE | グルジア | LV | ラトヴィア | SZ | スワジランド |
| BG | ブルガリア | GH | ガーナ | MA | モロッコ | TD | チャード |
| BJ | ベナン | GM | ガンビア | MC | モナコ | TG | トーゴ |
| BR | ブラジル | GN | ギニア | MD | モルドヴァ | TJ | タジキスタン |
| BY | ベラルーシ | GW | ギニア・ビサウ | MG | マダガスカル | TZ | タンザニア |
| CA | カナダ | GR | ギリシャ | MK | マケドニア旧ユーゴスラヴィア | TM | トルクメニスタン |
| CC | 中央アフリカ | HR | クロアチア | | 共和国 | TR | トルコ |
| CG | コンゴ | HU | ハンガリー | ML | マリ | TT | トリニダード・トバゴ |
| CH | スイス | ID | インドネシア | MN | モンゴル | UA | ウクライナ |
| CI | コートジボワール | IE | アイルランド | MR | モーリタニア | UG | ウガンダ |
| CN | 中国 | IL | イスラエル | MW | マラウイ | US | 米国 |
| CR | コスタ・リカ | IN | インド | MX | メキシコ | UZ | ウズベキスタン |
| CY | キプロス | IT | イタリア | ME | モンテネグロ | VN | ヴェトナム |
| CZ | チェコ | JP | 日本 | NL | オランダ | YU | ユーゴスラビア |
| DE | ドイツ | KE | ケニア | NO | ノルウェー | ZA | 南アフリカ共和国 |
| DK | デンマーク | KG | キルギスタン | NZ | ニュージーランド | ZW | ジンバブエ |
| | | KP | 北朝鮮 | PL | ポーランド | | |
| | | KR | 韓国 | PT | ポルトガル | | |
| | | | | RO | ルーマニア | | |

明細書

ラマン増幅器とそれを用いた光中継器及びラマン増幅方法

技術分野

本発明は各種光通信システムにおいて信号光の増幅に利用することができるラマン増幅器とそれを用いた光中継器及びラマン増幅方法に関するものであり、特に波長分割多重光の増幅に適するものである。

背景技術

現在の光ファイバ通信システムで使用される光増幅器のほとんどは、希土類添加ファイバ増幅器である。特にEr（エルビウム）を添加したファイバを使用するEr添加光ファイバ増幅器（以下、EDFAと記載する）がよく用いられる。しかし、EDFAの実用的な利得波長帯は1530nmから1610nm程度である。（参考文献：Electron. Lett, vol.33, no.23, pp. 1967 - 1968）また、EDFAは利得に波長依存性を持っており、波長分割多重光に用いる場合、信号光の波長によって利得に差が出る。図23はEDFAの利得波長依存性の一例を示したものであるが、1540nm以下と1560nm以上では特に波長に対する利得の変化が大きい。従って、そのような波長を含む帯域全体で一定の利得（大抵は利得偏差1dB 以内）を得るには、利得平坦化フィルタを使用する。

利得平坦化フィルタは利得が大きい波長の所で損失が大きくなるように設計されたフィルタであり、損失プロファイルは利得プロファイルとほぼ同じ形をしている。但し、EDFAは図24に示す様に平均利得の大きさが変化すると曲線a、b、cの様に利得プロファイルも変わるので、この場合、最適な利得平坦化フィルタの損失プロファイルも変わる。従って、損失プロファイルが固定的な利得補正フィルタによって平坦化が実現されている場合には、EDFAの利得が変化すると平

坦度が劣化してしまう。

一方、光増幅器には光ファイバのラマン散乱を利用したラマン増幅器と呼ばれるものもある（参考文献：Nonlinear Fiber optics, Academic Press）。ラマン増幅器は励起光の周波数よりも約13THz 低い周波数に利得のピークを持つ。以下の記述では、1400nm帯の励起光を使用した場合を前提とし、約13THz 低い周波数を約100nm 長い波長と表現する。図25に中心波長が1450nmの励起光を用いたときの利得の波長依存性を示す。このとき利得のピークは1550nmであり、利得偏差1dB 以内の帯域幅は20nm程度である。ラマン増幅器は励起光源さえ用意できれば、任意の波長を増幅することができるため、EDFAで増幅する事のできない波長帯での使用が主に検討されている。その一方、ラマン増幅器はEDFAの利得帯域では用いられていない。これはラマン増幅器がEDFAと同等の利得を得るためにより大きい励起光パワーを必要とするためである。加えて、大きなパワーの励起光をファイバに入射して利得を高めようとする、励起光による誘導ブリルアン散乱が発生して雑音が増えるため、ラマン増幅器の利用を難しくしている。特開平2-12986号公報にはラマン増幅器での誘導ブリルアン散乱を抑制する技術の一例が開示されている。

また、ラマン増幅器は利得に偏波依存性を有し、信号光に含まれる偏波成分の中で励起光の偏波と一致する成分に対してのみ増幅作用をもたらす。従って、偏波依存性による利得の不安定性を低減する対策が求められるが、これには、増幅用ファイバとして偏波面を保存するファイバを用いるか、偏波状態がランダムな励起光源を用いることが考えられている。

この他、ラマン増幅器は利得帯域の拡大も必要とされており、この方法として、波長の異なる複数の励起光を利用することが考えられている（参考文献：OFC98, PD-6）。しかしながら、利得偏差を1dB 以下にするという観点での取り組みはなされていない。

他方、光ファイバ伝送路において発生する伝送損失と波長分散を同時に補償す

る光中継器もあり、これはEr添加ファイバ増幅器（EDFA）と波長分散を補償するための分散補償用ファイバ（DCF）を組み合わせた構成である。図46はこの従来例であり、分散補償用ファイバAが2つのEr添加ファイバ増幅器B、Cで挟まれた構成となっている。第1のEr添加ファイバ増幅器Bは低レベルの信号光を比較的高いレベルに増幅するものであり、雑音特性に優れていることを特徴としている。第2のEr添加ファイバ増幅器Cは分散補償ファイバAにおいて減衰した光信号を再び高いレベルに増幅するものであり、出力レベルが高いことを特徴としている。

ところで前記光中継器は、その設計に際して、中継器入力レベル、中継器出力レベル、分散補償量（分散補償用ファイバAにおける損失）の各々を適切に設定する必要があり、また、分散補償用ファイバAの入力光レベルに上限値が存在するという制限項目もある。これは、分散補償用ファイバAへの入力パワーを大きくすると、分散補償用ファイバA中での非線形効果の影響が大きくなり、伝送波形の劣化が著しくなることによる。この分散補償用ファイバAへの入力パワーの上限値は、1波伝送時には自己位相変調（SPM）効果、WDM伝送時には相互位相変調（XPM）効果が決定要因となっている。以上、光中継器ではいくつかの変動要因を考慮して、その条件下で利得平坦度と雑音特性に優れた中継器を設計しなければならない。

図47は中継器内部における光レベルダイアグラムを示したものである。第1のEr添加ファイバ増幅器Bの利得 $G1$ [dB] は、中継器入力レベル P_{in} [dB] と分散補償用ファイバAへの入力上限値 P_d [dB] の差に設定される。第2のEr添加ファイバ増幅器Cの利得 $G2$ [dB] は、分散補償用ファイバAにおける損失 L_d [dB] と、中継器利得 G_r [dB] と、第1のEr添加ファイバ増幅器Bの利得 $G1$ [dB] とから $G_r + L_d - G1$ [dB] に設定される。これらの設計パラメータはシステム毎に異なるため、システム毎に $G1$ [dB]、 $G2$ [dB] は異なり、従って、Er添加ファイバ増幅器B、Cはシステム毎に再設計する必要がある。このようなシステムにおける雑

音特性は、分散補償用ファイバAにおける損失 L_d [dB] と深い関係があり、損失が大きい程、雑音特性が悪くなることが知られている。また、現在は伝送路の損失や分散補償用ファイバAの損失のばらつきを、Er添加ファイバ増幅器BやCの利得を変化させて補償したり、別途可変減衰器等を設けて調整しているが、前者は利得平坦度を劣化させ、後者は雑音特性を劣化させるため一長一短がある。

光ファイバ通信ではEr添加光ファイバ増幅器が普及しているが、Er添加光ファイバ増幅器にもいくつかの課題がある。また、ラマン増幅器も一般的な半導体レーザの出力が100 から200mW 程度であり、得られる利得は比較的小さいとか、利得が励起光のパワーや波長の変化に敏感であり、比較的高出力のファブリペロー型の半導体レーザを用いる場合には、そのモードホップが引き起こす利得変動による雑音が顕著となるとか、利得の大きさを調整する際に、励起レーザの駆動電流を変化させる必要があるが、駆動電流を変化させた場合の中心波長の変動は最大15nm程度あり、利得の波長依存性が大きく変わってしまうとかいった課題がある。また、このような中心波長のシフトは励起光を多重化するWDM カブラの結合損失の変化にもつながるので好ましくない課題がある。更に、光中継器もシステム毎にEr添加ファイバ増幅器B、Cを設計しなおす必要がある等課題がある。また、分散補償用ファイバを挿入することによる雑音特性の劣化は、現行の方式では、避け難い課題である。

誘導ラマン散乱現象を用いて信号光を増幅するラマン増幅方法では増幅媒体としての光ファイバに通信用光ファイバを用い、分布型増幅方式においては通信用光ファイバの広帯域で低損失で且つ波長依存性の少ない損失特性の1400nm～1600nm帯域に励起光の波長と信号光の波長とを配置する。この場合、増幅媒体である光ファイバの波長依存性損失は1380nmにピークを持つOHに起因するロスを考慮しても、最大値と最小値の格差は上記帯域内で約0.2dB/km以下である。また、この場合、波長多重励起方式を用いて各励起光強度に

差をつけなくても、各励起光で増幅される信号光の増幅強度はほぼ同等であり、通信上、特に問題はない。

しかしながら、前記ラマン増幅方法をEDFA（希土類添加ファイバ増幅器）のような増幅ユニットで行う場合、必要な利得を得るためにはファイバ長が10 km程度～数十km程度必要であることから、光ファイバの収納性に問題がでてくるため、できるだけ短くするのが望ましい。ファイバ長は非線形性の大きい光ファイバを用いることで短くすることができるが、非線形性の大きい光ファイバは、一般に1380 nm帯のOHに起因する伝送損失を低減するのが難しく、また、レイリー散乱係数が通信用ファイバより遥かに大きくなり、結果として、上記波長範囲内でのファイバ損失の最大値と最小値の差は1.5～10 dB/kmと非常に大きくなってしまう。これは増幅媒体としての光ファイバを3 km使う場合に、励起光の波長による損失差が4.5 dBから30 dBあることを意味しており、強度の等しい励起光では波長多重信号光を一様に増幅することができないことになる。

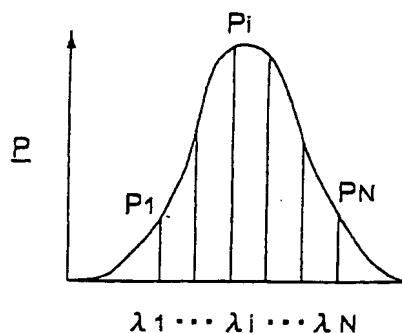
発明の開示

本発明の目的は、波長多重光を均一に増幅することができ、ユニット化に適したラマン増幅方法を提供することにある。本発明の他の目的は必要な利得を得ることができ、利得平坦化フィルタを使用する必要がない程度に利得の波長依存性を小さくすることができ、EDFAの帯域でも使用することができるラマン増幅器を提供することにある。本発明のさらに他の目的は前記ラマン増幅器をEr添加ファイバ増幅器（EDFA）と分散補償用光ファイバ（DCF）で構成される光中継器に応用して、システム毎にEDFAを再設計する必要がなく、光中継器の特性を劣化させることもなく、伝送路損失やDCF損失のばらつきを補償することもできる光中継器を提供する。また、DCFをラマン増幅することは、従来避けることのできなかったDCF挿入に起因する雑音特性の劣化を軽減することを示す。

本発明のラマン増幅器の構成例を図 1、2、3 に示す。励起光発生手段 1 に小型で比較的高出力のファブリペロー型の半導体レーザ 3 を用いたものは、比較的高い利得を得ることができ、さらに、ファブリペロー型の半導体レーザ 3 は発振波長の線幅が広いため、励起光による誘導ブリルアン散乱の発生をほぼなくすることができる。また、励起光発生手段 1 に DBF 型、DBR 型の半導体レーザ又は MOPA を用いたものは、発振波長の変動範囲が比較的小さいため、利得形状が駆動条件によって変化することがない。また、誘導ブリルアン散乱の発生は変調をかけることにより抑制することができる。

更に、励起光を中心波長の間隔を 6nm 以上 35nm 以下とすることにより利得平坦化フィルタを必要としない程度に利得の波長依存性を小さくすることができる。ここでいう中心波長 λ_c は、1 つの励起光について定義される値でレーザ発振の i 番目の縦モードの波長を λ_i 、同モードに含まれる光パワーを P_i としたとき次式で与えられる。

$$\lambda_c = \frac{\sum_i P_i \lambda_i}{\sum_i P_i}$$



励起光の中心波長間隔を6nm 以上とする理由は、反射帯域幅の狭い外部共振器5を接続したファブリペロー型の半導体レーザ3の発振帯域幅が図12に示す様に約3nm であることと、励起光を合波するためのWDM カブラ11（図1、2、3）に合波効率を良くするために励起光間の波長間隔にいくらかの余裕をもたせることを可能にするためである。WDM カブラ11は、異なる波長の光を別々のポートから入射し、入射光がほとんど損失を受けることなく1つの出力ポートへ結合するように設計されたものであるが、設計波長の中間の波長の光に対しては、どちらの入力ポートを使用しても損失が大きくなる。例えば、あるWDM カブラ11ではこの損失が大きくなる波長帯域の幅が3nm であった。従って、この帯域内に半導体レーザ3の帯域が含まれないようにするためには、図12に示す様に半導体レーザ3の帯域幅に3nm を加えた6nm が励起光の中心波長間隔の下限として適切である。一方、図13Aの様に半導体レーザ3の中心波長の間隔を35nm以上とすると、図13Bの様に隣り合う波長の励起光によって得られるラマン利得帯域の中間に利得の谷ができ、利得平坦度が悪くなる。これは、1つの励起光によって得られるラマン利得に関して、利得ピーク波長から15nmから20nm離れると利得が半分になることに起因する。従って、励起光の中心波長の間隔を6nm 以上35nm 以下とすることで、利得平坦化フィルタを使用する必要性がない程度に利得の波長依存性を小さくすることができる。

本発明のうち請求の範囲第2項記載のラマン増幅器は、ラマン増幅器への入力光又は出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、ラマン増幅器の出力光パワーを所定値に保つ制御手段4を備えるので、ラマン増幅器への入力信号パワーの変動やラマン増幅用ファイバの損失のばらつきによらず、一定の出力を得ることができる。

本発明のうち請求の範囲第3項記載のラマン増幅器は、ラマン利得を平坦化す

る出力光パワー制御手段4を備えるので、利得を平坦化することができる。特に、図16に示す様に各励起光の波長に各々約100nmを加えた波長の波長光をモニタし、それら波長光のパワーを揃える様に各励起光のパワーを制御すれば、利得を平坦化することができる。また、後に記載する波長安定化用のファイバグレーティング（外部共振器5）を接続したものでは、駆動電流の変化による中心波長の変化が抑えられるため、利得の制御を可能にする手段としても作用する。

本発明のうち請求の範囲第4項記載のラマン増幅器は、入力信号パワーと出力信号パワーをモニタし、それらの比が一定になる様に励起光パワーを制御して、ラマン増幅器の利得を所定値に保つ制御手段4を備えるので、ラマン増幅器への入力信号パワーの変動やラマン増幅用ファイバの損失のばらつきによらず、一定の利得を得ることができる。

本発明のうち請求の範囲第5項記載のラマン増幅器は、光ファイバ2に非線形屈折率 n_2 が $3.5 \times 10^{-20} \text{ [m}^2/\text{W}]$ 以上のものを使用するため、これまでの研究による成果であるが、十分な増幅効果が得られる。

本発明のうち請求の範囲第6項記載のラマン増幅器は、光ファイバ2が信号光を伝播するための伝送用ファイバの一部として存在するため、伝送用光ファイバにそのまま増幅器を構成することが可能である。

本発明のうち請求の範囲第7項記載のラマン増幅器は、分散マネジメント伝送路（Dispersion managed transmission lines）の一部を利用し、増幅媒体としてそのまま増幅器を構成することが可能である。

本発明のうち請求の範囲第8項記載のラマン増幅器は、光ファイバ2が信号光

を伝播するための伝送用ファイバと独立された、同伝送用ファイバ中に挿入されるラマン増幅用ファイバとして存在するため、光ファイバ2にラマン増幅に適した光ファイバを利用することや、波長分散補償用ファイバを利用することが容易にでき、また集中型増幅器を構成することができる。

本発明の光中継器は、ラマン増幅器を用いて光ファイバ伝送路8の損失を補償するため、前記ラマン増幅器の作用を持つ光中継器を得ることができる。

本発明の光中継器のうち、ラマン増幅器の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器9を備えたものは、これらラマン増幅器9及び希土類添加ファイバ増幅器10で光ファイバ伝送路8の損失を補償するので、様々な伝送系に適する所望の増幅特性を得ることができる。

本発明の光中継器のうち、ラマン増幅器9と希土類添加ファイバ増幅器10を組み合わせた構成では、様々なシステムに適応できる中継器を得ることができる。このことをラマン増幅器9の増幅用ファイバにDCFを用いた場合を例として以下に説明する。図17は従来の光中継器の設計パラメータの例であり、システム毎にG1、G2が異なっている。また、中継器入力とDCF損失は、中継器の間隔のばらつきやDCFのばらつきにより、変動することが避けられない。この変動はEDFAの利得の変動に直結しており、その利得の変化が平坦度の劣化につながる。図18はEDFAの利得と平坦度の関係を模式的に示したものであるが、平坦度の最適化は使用帯域と平均利得を限定して行われるため、平均利得が最適化した点からずれると、利得の波長依存性が変化して平坦度が劣化する。平坦度の劣化を避けるためには、EDFAの利得は一定に保たれる必要がある。従来は、入力レベルやDCF損失の変動を補償する手段として、可変減衰器が用いられてきた。図19Aに入力レベルの変動に応じて、可変減衰器の減衰量を調整し、DCFへの入力レベルを

一定に制御する例と、図19BにDCFの損失の変動に応じて、減衰量を調整し、中間損失を一定に制御する例を示す。どちらの場合も2つのEDFAは利得一定となっている。しかしながら、この方法では、可変減衰器によって無駄な損失を加えるため雑音特性上不利である。本発明では、中継器の設計パラメータの変化をDCFのラマン増幅効果で補償することによって、EDFAの利得を一定に保ち、システム毎にEDFAを設計する必要性をなくし、且つ平坦度も雑音特性も犠牲にすることなく、中継器間隔のばらつきやDCFのばらつきを補償することができる。図20は図17の中継器仕様に対して、DCFのラマン増幅効果を適用した場合のEDFAの設計値を示したものである。DCFのラマン利得を適当に選ぶことによって、3つの仕様に対して要求されるEDFAの特性を共通にすることができる。また、図21A、Bに示す様に入力レベルやDCF損失の変動は、EDFAの利得を変化させることなく、ラマン利得を変化させることによって補償することができる。いずれの場合も、EDFAの利得を一定に保ちつつ、DCFの出力レベルが一定になるようにラマン増幅利得を調整している。さらに、DCF自体の損失をラマン増幅で補償することは、従来避けることのできなかったDCF挿入に起因する雑音特性の劣化を軽減する。図37にDCF挿入した場合の雑音指数の劣化量と同じDCFを用いたラマン増幅器を挿入した場合の雑音指数の劣化量の測定値を示す。

本発明の光中継器において、波長合波していない励起光源を用いたラマン増幅器を備えたものは、複数の波長で励起されたラマン増幅器を備えた光中継器と比較すると動作範囲が狭いが構成が単純で帯域幅以外はこれまでに述べた光中継器と同等の特性を得ることができる。図38、図39に波長合波していない励起光源で励起されたラマン増幅器を用いた光中継器と複数の波長で励起されたラマン増幅器を用いた光中継器の測定例を示した。

本発明のラマン増幅器において、励起光の中心波長の最大値と最小値の差を100nm 以内とした場合、励起光と信号光との波長の重複を防止して信号光の波形劣化を防止することができる。励起光と信号光の波長が近いと信号光の波形劣化につながるため、励起光と信号光の波長は重複しないように選ばなければならないが、励起光が1.4 μm 帯の場合には、励起光の中心波長の最大値と最小値の差を100nm 以下とすると、図14に示す様に1つの励起光から生じる利得の中心波長とその励起光との波長の差は約100nm であるため、励起光と信号光との波長の重複を防止することができる。

本発明のラマン増幅器において、隣り合う波長の励起光を光ファイバ2に互いに異なる2方向に伝播して信号光を双方向励起する構成とした場合、図1や図2、図3に示されるWDM カブラ11に要求される波長特性をあまくすることができる。これは図15に示すように、双方向合わせた全ての励起光では中心波長が λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 となり間隔が6nm 以上35nm以下であるが、一方向の励起光だけについてみると中心波長が λ_1 と λ_3 、 λ_2 と λ_4 となり波長間隔は2倍になり、WDM カブラ11の要求特性に余裕を持たすことができる。

本発明のラマン増幅器において、ファブリペロー型の半導体レーザ3の出力側にファイバグレーティング等の波長安定化用の外部共振器5を設ければ、ファブリペロー型の半導体レーザ3のモードホップによる利得の変動による雑音を抑制することができる。また、半導体レーザ3に波長安定化用の外部共振器5を接続すると、1つの励起光源について見ると帯域幅を狭くすることになるが、WDM カブラ11（図1、2、3）で合波する際に、波長間隔を狭くすることができるため、最終的には、より高出力で広帯域な励起光が得られる。

本発明の増幅器において、半導体レーザ3の励起光を各波長毎に偏波合成して

使用すれば、利得の偏波依存性を解消すると同時に光ファイバ2に入射される励起光パワーを増加させることができる。ラマン増幅において利得が得られるのは、励起光の偏波と一致する成分のみであるため、励起光が直線偏波であり且つ増幅用ファイバが偏波保持ファイバでない場合、信号光と励起光の相対偏波の変動により利得が変動するが、直線偏波の励起光源を偏波面が直交するように合成することは、利得の偏波依存性を解消すると同時にファイバに入射される励起光パワーを増加させることになる。

本発明のラマン増幅器において、複数の波長のファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPAを合波する手段として、マッハツェンダ干渉計を原理とする平面光波回路型の波長合波器を使用すれば、複数の波長のファブリペロー型の半導体レーザを多数合波する場合にも、極めて低損失で合波することができ、高出力な励起光が得られる。

本発明のラマン増幅器において、図6に示す様に偏波面を90度回転する偏波面回転手段7を備え、光ファイバ2に励起光発生手段1で発生された複数の励起光とそれらと偏波面が直交される励起光とが同時に存在する様にすれば、原理的には、信号光の偏波面がいかようであろうとも常に一定の利得を得ることができる。ラマン増幅の帯域は、励起光の帯域に依存するため、複数の波長の励起光をWDMカプラ11で合波することは、増幅用の光ファイバ2に入射される励起光を広帯域化し、その結果としてラマン利得を広帯域化することになる。

本発明の光中継器において、ラマン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路8に入射し、光ファイバ伝送路8におけるラマン増幅効果を利用すれば、光ファイバ伝送路8の損失の一部を補償することができる。

本発明の光中継器において、ラマン増幅器の残留励起光を希土類添加ファイバ増幅器10の励起光として利用すれば、使用する半導体レーザの数を減らすことができる。

本発明の光中継器において、ラマン増幅器9の光ファイバ2に分散補償用ファイバを用いれば、当該ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8の波長分散を補償し、光ファイバ伝送路8及び増幅用ファイバ2における損失の一部又は全てを補償することができる。

本発明のうち請求の範囲第29項記載のラマン増幅方法は、中心波長が異なる2以上の励起光と信号光とをラマン増幅媒体である光ファイバに伝播して、前記信号光をラマン増幅するためのラマン増幅方法において、中心波長が短い励起光ほど光パワーを高くしたものである。

本発明のうち請求の範囲第30項記載のラマン増幅方法は、中心波長が異なる2以上の励起光と信号光とをラマン増幅媒体である光ファイバに伝播して、前記信号光をラマン増幅するためのラマン増幅方法において、2以上の励起光の最短中心波長と最長中心波長の中心よりも短波長側の励起光のトータル光パワーを長波長側の励起光のトータル光パワーよりも高くしたものである。

本発明のうち請求の範囲第31項記載のラマン増幅方法は、中心波長が異なる3以上の励起光と信号光とをラマン増幅媒体である光ファイバに伝播して、前記信号光をラマン増幅するためのラマン増幅方法において、3以上の励起光の最短中心波長と最長中心波長の中心よりも短波長側に中心波長をもつ励起光源の数を長波長側に中心波長をもつ励起光源の数よりも多くし、短波長側の励起光のトータル光パワーを長波長側の励起光のトータル光パワーよりも大きくしたものである。

図面の簡単な説明

図1は本発明のラマン増幅器の第1の実施形態を示すブロック図。図2は本発明のラマン増幅器の第2の実施形態を示すブロック図。図3は本発明のラマン増幅器の第3の実施形態を示すブロック図。図4は本発明のラマン増幅器における出力光パワー制御手段の第1の例を示すブロック図。図5は本発明のラマン増幅器における出力光パワー制御手段の第2の例を示すブロック図。図6A、図6Bは本発明のラマン増幅器における偏波面回転手段の異なる例を示すブロック図。

図7は本発明の光中継器の第1の実施形態を示すブロック図。図8は本発明の光中継器の第2の実施形態を示すブロック図。図9は本発明の光中継器の第3の実施形態を示すブロック図。図10は本発明の光中継器の第4の実施形態を示すブロック図。図11は本発明の光中継器の第5の実施形態を示すブロック図。図12は励起光の波長間隔を6nm以上にする理由を示した説明図。図13A、図13Bは励起光の波長間隔を35nm以下にする理由を示した説明図。図14は励起光の最大波長と最小波長との差を100nm以下にする理由を示した説明図。図15は双方向励起における励起光の波長配列の例を示した説明図。図16は励起光パワーを制御して帯域利得を平坦化する様子を示した説明図。図17A、Bは光中継器の設計に関する特性を示した説明図。図18はEDFAの利得変動と平坦度劣化の関係を示した説明図。図19Aは可変減衰器による入力レベル変動の補償の様子を示した説明図、図19Bは可変減衰器によるDCF損失変動の補償の様子を示した説明図。図20A、BはDCFラマン増幅効果を利用した光中継器の設計に関する特性を示した説明図。図21Aはラマン増幅効果による入力レベル変動の補償の様子を示した説明図、図21Bはラマン増幅効果によるDCF損失変動の補償の様子を示した説明図。図22はラマン増幅器による出力スペクトルの異なる例を示した説明図。図23はEDFAによる利得の波長依存性を示した説明図。図24はEDFAによる利得の変動を示した説明図。図25はラマン増幅による利得の波長依存性を示した説明図。図26は入力光をモニタして出力光パワーを制御する制御方法のブロック図。図27は出力光をモニタして出力光パワーを制御する制御方法のブロック図。図28は入力光と出力光とをモニタして出力光パワーを制御する制御方法のブロック図。図29はラマン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路に伝送してラマン利得を得る方法の第1例を示したブロック図。図30はラマン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路に伝送してラマン利得を得る方法の第2例を示したブロック図。図31はラマン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路に伝送してラマン利得を得る方法の第3例を示したブロック図。図32はラ

マン増幅器の残留励起光を光ファイバ伝送路に伝送してラマン利得を得る方法の第4例を示したブロック図。図33はラマン増幅器の残留励起光をEDFAの励起光として活用する方法の第1例を示したブロック図。図34はラマン増幅器の残留励起光をEDFAの励起光として活用する方法の第2例を示したブロック図。図35はラマン増幅器の残留励起光をEDFAの励起光として活用する方法の第3例を示したブロック図。図36はラマン増幅器の残留励起光をEDFAの励起光として活用する方法の第4例を示したブロック図。図37は分散補償用ファイバ挿入による雑音指数の劣化を示した説明図。図38はラマン増幅器の励起波長数と中継器の特性を示した説明図。図39はラマン増幅器の励起波長数と中継器の特性を示した説明図。図40は複数のラマン増幅器を多段接続してなる光中継器のブロック図。図41は単一の励起光光源を有する励起光発生手段の一例を示したブロック図。図42は単一の励起光光源を有する励起光発生手段の他の例を示したブロック図。図43は2つの励起光光源を有する励起光発生手段の一例を示したブロック図。図44は2つの励起光光源を有する励起光発生手段の他の例を示したブロック図。図45は分散補償用ファイバを増幅用ファイバとするラマン増幅器のブロック図。図46は従来の光中継器の一例を示したブロック図。図47は図46の光中継器における光レベルダイアグラムを示した説明図。図48は増幅用ファイバとしてSMFと $-20/\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 未満の分散を持つファイバを用いた場合を示すブロック図。図49は本発明のラマン増幅方法を実施化するための構成の一例を示す説明図。図50は図49における励起光源光源を示す説明図。図51は本発明のラマン増幅方法によりラマン増幅された光信号の利得プロファイル。図52は従来方法によりラマン増幅された光信号の利得プロファイル。図53は本発明のラマン増幅方法を実施化するための構成の他例を示す説明図。

発明を実施するための最良の形態

(ラマン増幅器の実施形態1)

図1は本発明のラマン増幅器の第1の実施形態であり、信号光入力ファイバ12と、増幅用ファイバ(光ファイバ)2、WDM カプラ13、励起光発生手段1、モニタ光分配用カプラ14、モニタ信号検出及びLD制御信号発生回路15、信号光出力ファイバ16、偏波無依存アイソレータ25から構成されている。ここでモニタ光分配用カプラ14とモニタ信号検出及びLD制御信号発生回路15は出力光パワー制御手段4を構成している。

励起光発生手段1は、ファブリペロー型の半導体レーザ3(3₁、3₂、3₃、3₄)と、波長安定化用のファイバグレーティング(外部共振器)5(5₁、5₂、5₃、5₄)と、偏波合成カプラ(偏波合成器)6(6₁、6₂)と、WDM カプラ11とから構成されている。ここで半導体レーザ3₁、3₂の発振波長と、ファイバグレーティング5₁、5₂の透過波長は共に同じ波長 λ_1 であり、半導体レーザ3₃、3₄の中心波長と、ファイバグレーティング5₃、5₄の透過波長は共に同じ波長 λ_2 であり、半導体レーザ3₁、3₂、3₃、3₄の発振波長は波長安定化用ファイバグレーティング5₁、5₂、5₃、5₄の作用により中心波長が λ_1 、 λ_2 に安定化されるようにしてある。また前記波長 λ_1 と λ_2 の波長間隔は6nm 以上35nm以下としてある。

前記半導体レーザ3₁、3₂、3₃、3₄で発生される励起光はその波長 λ_1 、 λ_2 ごとに偏波合成カプラ6で偏波合成され、各偏波合成カプラ6の出力光がWDM カプラ11で合波されて励起光発生手段1の出力光となるようにしてある。半導体レーザ3から偏波合成カプラ6の間は偏波面保存ファイバ17で接続され、偏波面が異なる2つの励起光が得られる様にしている。励起光発生手段1の出力光はWDM カプラ13により増幅用ファイバ2に結合され、一方、信号光(波長分割多重光)は信号光入力ファイバ12より増幅用ファイバ2に入射され、同増幅用ファイバ2で励起光発生手段1の励起光と合波されてラマン増幅され、WDM

カプラ13を通過し、モニタ光分岐用カプラ14において、その一部はモニタ信号として分岐され、残りは信号光出力ファイバ16へ出力される。前記モニタ信号はモニタ信号検出及びLD制御信号発生回路15において監視され、同回路15は信号波長帯域内の利得偏差が小さくなるように各半導体レーザ3の駆動電流を制御する信号を発生する。

前記増幅用ファイバ2はラマン増幅に適した特殊ファイバ、例えば非線形屈折率 n_2 が $3.5 \times 10^{-20} \text{ [m}^2/\text{W}]$ 以上であるものを用いても良いし、信号光が入力される信号入力ファイバ12をそのまま延長して用いても良い。また、図48に示すようにkm当たり-20ps/nm未満の分散を持つRDF (Reverse Dispersion Fiber) をSMFにつなぎ、伝送路を兼ねた増幅用ファイバとして使用してもよい。(一般にRDFは-20ps/nm未満の分散を持つためにSMFの長さと同程度から2倍の長さで使用すると良い。)このような場合には、ラマン増幅用の励起光がRDFからSMFへ向って伝播するような構成とするのが好都合である。このラマン増幅器は増幅用ファイバ2を信号光が伝送される図示されていない伝送用ファイバとは独立して、同伝送用ファイバに接続・挿入可能な構成とし、増幅用ファイバ2や励起光発生手段1、WDMカプラ13、モニタ光分岐用カプラ14、モニタ信号検出及びLD制御信号発生回路15を一式組み込んで集中型ラマン増幅器を構成することもできる。

図22は図1のラマン増幅器における出力スペクトルを測定したものである。この測定で用いた励起光波長 λ_1 、 λ_2 は1435nmと1465nm、信号光は-20dBm/ch 1540nmから1560nmの間に等間隔に8波入力した。増幅用ファイバ2は約6kmの分散補償用ファイバで、チャンネル間偏差を0.5dB以内に保ちつつ、分散補償用ファイバの損失を補償するように励起光のパワーが調整されている。

(ラマン増幅器の実施形態2)

図2は本発明のラマン増幅器の第2の実施形態であり、励起光発生手段1から

の励起光が増幅用ファイバ2を信号光と同じ向きに進行されるように構成されたものである。具体的には増幅用ファイバ2の前端側にWDM カブラ13が設けられ、励起光発生手段1からの励起光がWDM カブラ13を介して増幅用ファイバ2の前端（入力端）側から後端（出力端）側へと伝送されるようにしたものである。この構成では、信号の減衰が起こる前に増幅されるため、実施形態1の構成と比較して、信号光の雑音特性が良いことがわかっている。また、実施形態1の構成と比較すると利得が小さいこともわかっている。

（ラマン増幅器の実施形態3）

図3は本発明のラマン増幅器の第3の実施形態であり、励起光発生手段1からの励起光が増幅用ファイバ2を双方向に進行されるように構成されたものである。具体的には、増幅用ファイバ2の前端側と後端側とに夫々WDM カブラ13が設けられ、2つのグループに分けられた励起光発生手段1からの励起光が夫々のWDM カブラ13を通じて増幅用ファイバ2に結合され、前端側のWDM カブラ13に入力された励起光が増幅用ファイバ2の後端側に進行され、後端側のWDM カブラ13に入力された励起光が増幅用ファイバ2の前端側に進行されるようにしたものである。

前記励起光発生手段1のうち第1のグループAに属する半導体レーザ3₁、3₂と第2のグループBに属する半導体レーザ3₃、3₄の中心波長はいずれも同じであり、第1のグループAに属する半導体レーザ3₃、3₄と第2のグループBに属する半導体レーザ3₁、3₂の中心波長はいずれも同じである。また、ファイバグレーティング5₁～5₄は夫々が接続される半導体レーザ3の中心波長に合わされている。

（ラマン増幅器の実施形態4）

前記図3の実施形態において、第1のグループAに属する半導体レーザ3₁、

3₂の中心波長を λ_1 、同グループAに属する半導体レーザ3₃、3₄の中心波長を λ_3 、第2のグループBに属する半導体レーザ3₅、3₆の中心波長を λ_2 、同グループBに属する半導体レーザ3₇、3₈の中心波長を λ_4 とし、 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 を互いに隣り合う波長として構成することもできる。この場合も、中心波長の間隔は10nm以上30nm以下であり、最大の中心波長 λ_4 と最小の中心波長 λ_1 との差は100nm以下である。このような構成では同一グループ内で合波する励起光の波長間隔に余裕を持たすことができ、WDM カプラ4に要求される性能を甘くすることができる。

(ラマン増幅器の実施形態5)

図40は本発明のラマン増幅器の第5の実施形態であり、前記各実施形態で説明したラマン増幅器9の中から適当なものを選び、それらを多段接続したものである。所望の増幅特性や雑音特性に合わせて、特徴の異なるラマン増幅器9を適切に選択することで、単一のラマン増幅器9では得られない特性を得ることができる。

前記各実施形態において、出力光パワー制御手段4は図4又は図5に示す構成とすることができる。図4の構成は、図1又は図2又は図3に示したモニタ光分岐用カプラ14に、波長分波器18とホトダイオード等の光/電変換手段19と、LD制御回路20とからなるモニタ信号検出及びLD制御信号発生回路15が接続されたものである。波長分波器18はモニタ光分岐用カプラ14で分岐された出力光を複数の波長光に分波し、この場合、個々の励起光による最大増幅波長（励起光波長に100nmを加えた波長）付近の光を分波し、具体的には、励起波長が1430nmと1460nmとならば、1530nmと1560nm付近の波長光を分波する。光/電変換手段19は受光した波長光を電気信号に変換するもので、受光レベルの大小に応じて出力電圧が変化される。LD制御回路20は光/電変換手段19からの出力電圧に応じて半導体レーザ3の駆動電流を変化するものであり、光/電変換手段19

からの出力電圧を演算処理して、前記各波長光の光パワーを揃える様に半導体レーザー3を制御する。即ち、出力光パワー制御手段4はラマン利得の波長依存性を解消して利得を平坦化する働きをする。

図5の構成は、図1又は図2又は図3に示したモニタ光分岐用カブラ14に、分岐カブラ21と、バンドパスフィルタ22と、ホトダイオード等の光／電変換手段19と、LD制御回路20とからなるモニタ信号検出及びLD制御信号発生回路15が接続されたものである。分岐カブラ21はモニタ光分岐用カブラ14で分岐された出力光を励起光の数と同数に分岐するものである。バンドパスフィルタ22は夫々透過中心波長が異なり、この場合、個々の励起光による最大増幅波長（励起光波長に100nmを加えた波長）付近の光を透過し、具体的には、励起波長が1430nmと1460nmとならば、1530nmと1560nm付近の波長光を透過する。光／電変換手段19は受光した波長光を電気信号に変換するもので、受光レベルの大小に応じて出力電圧が変化される。LD制御回路20は光／電変換手段19からの出力電圧に応じて半導体レーザー3の駆動電流を変化するものであり、光／電変換手段19からの出力電圧を演算処理して、前記各波長光の光パワーを揃える様に半導体レーザー3を制御する。即ち、出力光パワー制御手段4はラマン利得の波長依存性を解消して利得を平坦化する働きをする。図4、5は図27に示す様に出力光をモニタして励起光発生手段1を制御する構成であるが、図26に示す様に入力光をモニタして励起光発生手段1を制御する構成とすることもでき、或いは図28に示す様に出力光と入力光とを共にモニタして励起光発生手段1を制御する構成とすることもできる。

前記各構成のラマン増幅器においては、励起光を偏波合成カブラ6で合成する代わりに、図6A、Bに示す様に励起光の偏波面を90度回転する偏波面回転手段7を設け、増幅用ファイバ2に励起光発生手段1で発生された複数の励起光とそれらと偏波面が直交される励起光とが同時に存在する様にすることもできる。図6Aは増幅用ファイバ2の一端にファラデーロータ3₁と全反射ミラー3₂を設

けて、増幅用ファイバ2に伝播された励起光を偏波面を90度回転し、再び増幅用ファイバ2に戻す様にしたものである。同図には増幅用ファイバ2に伝播されてラマン増幅された信号光を同ファイバ2から取り出すための手段は示していない。図6Bは増幅用ファイバ2の一端にPBS 33と偏波面保持ファイバ34とを設け、増幅用ファイバ2の一端から出力される励起光を主軸が90度振られて接続された偏波面保持ファイバ34により偏波面を90度回転し、再びPBS 33を通じて増幅用ファイバ2の一端に入力するようにしたものである。

(光中継器の実施形態1)

図7は本発明のラマン増幅器を用いて構成された光中継器の第1の実施形態であり、光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器の例である。この光中継器は図1、2、3に示した様なラマン増幅器9の後段に希土類添加ファイバ増幅器（以下、EDFAと記載する）10が接続されており、光ファイバ伝送路8に伝送される信号光がラマン増幅器9に入力されて増幅され、更にEDFA10に入力されて増幅され、光ファイバ伝送路8に出力される様にしたものである。利得調整はラマン増幅器9側で調整しても、EDFA10側で調整しても、その両方で調整しても良いが、全体で光ファイバ伝送路8の損失が補償される様にする。また、EDFA10が持つ利得の波長依存性と、ラマン増幅器9の波長依存性との違いをうまく合わせて、EDFA10が持つ利得の波長依存性をラマン増幅器9の波長依存性により低減することも可能である。

(光中継器の実施形態2)

図8は本発明のラマン増幅器を用いて構成された光中継器の第2の実施形態であり、図7の光中継器において、ラマン増幅器9の前段にもEDFA10を設けたものである。尚、EDFA10はラマン増幅器9の前段にのみ設けてもよい。

23

(光中継器の実施形態3)

図9は本発明のラマン増幅器を用いて構成された光中継器の第3の実施形態であり、2つのEDFA10の間に分散補償ファイバ(DCF)を増幅ファイバ2として用いるラマン増幅器9が設けられたものである。ラマン増幅器9とその後段のEDFA10との間には、ラマン増幅器9からの出力光を分岐する分岐カブラ23と、その分岐光をモニタしてラマン増幅器9の利得を制御するモニタ信号検出及びLD制御信号発生回路24とが設けられている。モニタ信号検出及びLD制御信号発生回路24はラマン増幅器9の出力パワーを所定値に保つことができるような制御回路である。なお、ラマン増幅器9自体が図4や図5に示す出力光パワー制御手段4を備える場合は、出力光のパワーが所定値になるように制御されると同時に、複数の出力信号間のレベル偏差が小さくなるようにも励起光のパワーが制御される。

図9の光中継器では、ラマン増幅器9の出力光レベル、即ち第2のEDFA10への入力光レベルがDCFの損失や第1のEDFA10の出力レベルに影響されることなく、常に一定に保たれる。これは、中継器の出力が規定されている場合に、第2のEDFA10の利得が一定に保たれるということを保証する。これにより、DCFの損失変動などに起因する第2のEDFA10の利得平坦度劣化が回避される。また、第1のEDFA10が利得一定となるように制御するならば、中継器への入力の変動はラマン増幅器9の利得の変動で補償される。つまり、中継器利得の調整はラマン増幅器9の利得のみで行われることとなり、EDFA10の利得変動による平坦度の劣化を完全に回避することができる。

(光中継器の実施形態4)

図10は図9の実施形態において、第1のEDFA10とラマン増幅器9との間にも光レベルをモニタしてラマン増幅器9の利得を調整する制御手段を付加したものである。これを用いて、ラマン増幅器9の入力と出力のレベル差を一定に保つ

ように励起光を制御することができ、これはDCFの損失ばらつきのみを補償することができる。

(光中継器の実施形態5)

図11は上記実施形態において、ラマン増幅器9内に設けられている利得平坦化モニタ機構を中継器の出力端に移し、中継器全体の利得を平坦化するモニタとして利用する例である。この場合、第1のEDFA10及び第2のEDFA10は利得一定制御と出力一定制御のどちらでも構わない。中継器出力における出力信号間のレベル偏差が小さくなるように各励起光のパワーが個別に制御される。

(光中継器の実施形態6)

本件発明の光中継器は図1～図3に示す構成のラマン増幅器の増幅用ファイバ2に分散補償ファイバを使用して、光ファイバ伝送路8の波長分散を補償し、光ファイバ伝送路8及び増幅用ファイバ2における損失の一部又は全てを補償する光中継器を構成することもできる。

(光中継器の実施形態7)

前記光中継器の各実施形態において、図41から図44に示す様な励起光発生手段1を使用したラマン増幅器9を備えた光中継器を構成することもできる。

(光中継器の実施形態8)

図29～図32に示す様にラマン増幅器9の増幅用ファイバ2の途中にWDMカブラ13を挿入し、増幅用ファイバ2に伝播される励起光発生手段1からの残留励起光をラマン増幅器9の入力側又は出力側の光ファイバ伝送路8に設けたWDMカブラ27を通じて同伝送路8に入射し、光ファイバ伝送路8においてもラマン利得を生じさせることができる。なお、図29～図32において26は光アイソレ

ータである。

(光中継器の実施形態9)

図33～図36に示す様に、光中継器がラマン増幅器9とEDFA10とからなる場合、ラマン増幅器9の増幅用ファイバ2の途中にWDM カプラ13を挿入し、増幅用ファイバ2に伝播される励起光発生手段1からの残留励起光をEDFA10に入射し、同EDFA10の励起光／補助励起光とすることができる。なお、図33～図36において26は光アイソレータである。

(ラマン増幅方法の実施形態1)

本発明のラマン増幅方法の実施形態を図49～図52に基づいて詳細に説明する。この実施形態では図49のラマン増幅媒体50に非線形性の高い分散補償ファイバ(DCF)を用い、それに励起光源51から発振される励起光を合波器52を用いて入射し、伝送する。この場合、励起光源51として図50に示す様に4つの励起光源(半導体レーザ)、ファイバブラッググレーティング(FBG)、偏波合成器(PBC)、WDM等から構成される4chWDMLDユニットを使用した。図50の夫々の半導体レーザは発振する励起光の中心波長が異なり、具体的には中心波長が1435nm、1450nm、1465nm、1480nmの励起光を発振する。これら励起光はDCFにより伝送されてくる信号光にラマン利得を与えて信号光を増幅する。この場合、各励起光はその周波数より約13THz 低い周波数、即ち約100nm長い波長に利得のピークを有する。

6kmの長さのDCFの一端から同DCFに1500nm～1600nmの信号光を伝播し、そのDCFに1400nm、1420nm、1440nm、1460nm、1480nmの励起光を入射して、前記信号光をラマン増幅する場合に、入力信号光と同DCFの他端から出力される出力信号光(ラマン増幅された

信号光) とを調べて、波長と DCF の総損失を調べた。表 1 は波長と DCF 総損失との関係をまとめたものであり、波長依存性を持つことが明らかである。

【表 1】

| 波長 (nm) | 単位損失 (dB/km) | 総損失 (dB) |
|---------|--------------|----------|
| 1400 | 6.76 | 40.56 |
| 1420 | 3.28 | 19.68 |
| 1440 | 1.74 | 10.44 |
| 1460 | 1.16 | 6.96 |
| 1480 | 0.85 | 5.10 |
| 1500 | 0.69 | 4.14 |
| 1520 | 0.62 | 3.72 |
| 1540 | 0.57 | 3.42 |
| 1560 | 0.55 | 3.30 |
| 1580 | 0.54 | 3.24 |
| 1600 | 0.59 | 3.54 |

ここで半導体レーザの受ける損失と、半導体レーザによって約100nm長波長側で増幅される信号光の受ける損失とを併せて効果総損失として考えると、波長と効果総損失の関係は表2のようになる。

【表2】

| 波長 (nm) | 効果総損失 (dB) | |
|---------|------------|-------|
| 1400 | 40.56+4.14 | 44.7 |
| 1420 | 19.68+3.72 | 23.4 |
| 1440 | 10.44+3.42 | 13.86 |
| 1460 | 6.96+3.30 | 10.26 |
| 1480 | 5.10+3.24 | 8.34 |

ラマン増幅自体の波長依存性は殆ど無いため、波長毎の増幅効率はこの効果総損失の影響を受けると考えれば、この効果総損失分を夫々所望の増幅特性に必要な半導体レーザの出力に上乘せすることにより、各波長光をほぼ均一にラマン増幅することができ、利得の波長依存性を解消することができる。そこで、本実施形態では中心波長が短い励起光ほど光パワーを高くした。

(ラマン増幅方法の実施形態2)

本実施形態のラマン増幅方法は、DCFにより伝送される1500nm～1600nmの信号光をほぼ均一にラマン増幅するために、DCFに入射される2以上の励起光のうち、最短中心波長と最長中心波長との中心よりも短波長の励起光の光パワーを高くするようにした方法である。具体的には図50の励起光源51

から発振されてDCFに入射される励起光の中心波長を1435nm、1450nm、1465nm、1480nmとし、それらの光パワーを次の様にした。即ち、DCFに入射される4つの励起光の最短中心波長である1435nmと、最長中心波長である1480nmの中心波長である1457nmよりも短波長である1435nm、1450nmの励起光のパワーを高くした。

1435nmの光パワー：563mW

1450nmの光パワー：311mW

1465nmの光パワー：122mW

1480nmの光パワー：244mW

この結果、DCFにより伝送される1500nm～1600nmの信号光のランマン増幅後の利得プロファイルは図51の様に、1540～1590nmまで約11dBの利得となり、平坦度が1dBとなった。即ち、DCFにより伝送される各波長光をほぼ均一にランマン増幅することができた。

ちなみに、励起光源51から発振されてDCFに入射される励起光の中心波長を1435nm、1450nm、1465nm、1480nmとし、各励起光の光パワーを563mWに均一にした場合は、DCFにより伝送される1500nm～1600nmの信号光のランマン増幅後の利得プロファイルは図52の様なった。即ち、1580nm付近で24dB程度の利得が得られているが、広帯域のゲインフラットネスは得られていない（ファイバのロス波形が裏返っている）。

（ランマン増幅方法の実施形態3）

図53は本発明のランマン増幅方法の第3の実施形態を示すものである。同図のランマン増幅方法では励起光の合波にマッハツェンダ干渉計を原理とする合波器を用いており、合波できる励起光の波長は等間隔となる。本実施形態では、合波可能な波長のうちのいくつかの波長を未使用とし、励起光帯域の短波長側の波長数

を長波長側の波長数よりも多くしている。この構成において、全ての波長の励起光のパワーを同じにした場合、短波長側の励起光のトータルパワーが長波長側の励起光のトータルパワーよりも大きくなり、前記実施形態2のように、励起光が等間隔に配置された状況で、短波長側のパワーを長波長側のパワーよりも大きく設定することと実効的には同じとなる。従って、図53のようにすることで、一つ一つの励起光のパワーに大きな差を生じさせることなく、利得プロファイルを平坦化することができる。これは、一つの励起光からの出力パワーの上限を決めた上で、所定の帯域の利得プロファイルを平坦化し得る励起光のトータルパワーを大きくできるということであり、増幅器の利得を大きくとれることを意味する。

産業上の利用可能性

本発明のラマン増幅器では、中心波長の間隔が6nm以上35nm以下であり、中心波長の最大値と最小値の差が100nm以内であるように励起光源の波長を選択することにより、利得平坦化フィルタを使用する必要がある程度に利得の波長依存性が小さくかつ利得が変化しても平坦度を保つことのできる光増幅器を提供することができる。また、この増幅器は伝送路の損失と波長分散を補償する光中継器として応用することも可能である。EDFAとの組み合わせで構成される中継器においては、中継器の入力変動やDCF損失変動によるEDFAの利得変動を抑え、利得平坦度の劣化を回避することができ、様々なシステムに適応することができる。

本発明のラマン増幅方法では、DCFに入射される2以上の励起光のうち中心波長が短い励起光ほどパワーを高くするか、DCFに入射される2以上の励起光のうち最短中心波長と最長中心波長の中心波長よりも短波長の励起光のパワーを高くしたので、いずれの場合も、非線形性の大きい光ファイバを用いても約1500nm～約1600nmの波長多重光をほぼ同様な利得で増幅することが

できる。言い換えれば、非線形性の高い光ファイバを用いて、短い光ファイバで必要な利得を得ることができる。また、光ファイバ長を短くすることができるので、ユニット化に適したラマン増幅器を提供することもできる。

請求の範囲

1. 複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下としたラマン増幅器。

2. 複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、入力光又は出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、出力光パワーを所定値に保つ出力光パワー制御手段4を備えたラマン増幅器。

3. 複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、増幅器出力の波長依存性を平坦化する出力光パワー制御手段4を備えたラマン増幅器。

4. 複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、入力光パワーと出力光パワーとをモニタし、それらの比が一定になる様に励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、利得を所定値に保つ出力光パワー制御手段4を備えたラマン増幅器。

5. 複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用の光ファイバ2は非線形屈折率 n_2 が $3.5E-20$ [m²/W] 以上であるラマン増幅器。

6. 複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用の光ファイバ2が伝送路の一部として存在するラマン増幅器。

7. 複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から

出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用のファイバ2としてSMFと-20/ps/nm/km未満の分散を持つファイバを用いたラマン増幅器。

8. 複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用の光ファイバ2が信号光を伝播するための伝送用ファイバから独立したものであり、同伝送用ファイバ中に挿入可能なラマン増幅用ファイバとして存在するラマン増幅器。

9. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器であって、複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下としたラマン増幅器を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器。

10. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を

34

補償する光中継器であって、複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、入力光又は出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、出力光パワーを所定値に保つ出力光パワー制御手段4を備えたラマン増幅器を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器。

11. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器であって、複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、増幅器出力の波長依存性を平坦化する出力光パワー制御手段4を備えたラマン増幅器を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器。

12. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器であって、複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA

35

3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、入力光パワーと出力光パワーとをモニタし、それらの比が一定になる様に励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、利得を所定値に保つ出力光パワー制御手段4を備えたラマン増幅器を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器。

13. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器であって、複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用の光ファイバ2は非線形屈折率 n_2 が $3.5 \times 10^{-20} [\text{m}^2/\text{W}]$ 以上であるラマン増幅器を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器。

14. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器であって、複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用の光ファイバ2が伝送路の一部として存在するラマン増幅器を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器。

15. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器であって、複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用のファイバ2としてSMFと-20/ps/nm/km未満の分散を持つファイバを用いたラマン増幅器を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器。

16. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器であって、複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用の光ファイバ2が信号光を伝播するための伝送用ファイバから独立したものであり、同伝送用ファイバ中に挿入可能なラマン増幅用ファイバとして存在するラマン増幅器を備え、同ラマン増幅器9で光ファイバ伝送路8における損失を補償する光中継器。

17. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失をラマン増幅器9によって補償する光中継器であって、前記ラマン増幅器9は複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロ

37

一型、DFB 型、DBR 型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm 以上35nm以下としたものであり、当該ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備えた光中継器。

18. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失をラマン増幅器9によって補償する光中継器であって、前記ラマン増幅器9は複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB 型、DBR 型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm 以上35nm以下とし、入力光又は出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、出力光パワーを所定値に保つ出力光パワー制御手段4を備えたものであり、当該ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備えた光中継器。

19. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失をラマン増幅器9によって補償する光中継器であって、前記ラマン増幅器9は複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB 型、DBR 型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm 以上35nm以下とし、出力光をモニタし、その結果に基づいて励起光発生手段1の各励起光パワーを制御して、増幅器出力の波長依存性を平坦化する出力光パワー制御手段4を備

えたものであり、当該ラマン増幅器 9 の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器 10 を備えた光中継器。

20. 光ファイバ伝送路 8 中に挿入されて同光ファイバ伝送路 8 における損失をラマン増幅器 9 によって補償する光中継器であって、前記ラマン増幅器 9 は複数の励起光を発生する励起光発生手段 1 を備え、同励起光発生手段 1 から出力される複数の励起光と光ファイバ 2 に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段 1 はファブリペロー型、DFB 型、DBR 型の半導体レーザ又は MOPA 3 を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を 6nm 以上 35nm 以下とし、入力光パワーと出力光パワーとをモニタし、それらの比が一定になる様に励起光発生手段 1 の各励起光パワーを制御して、利得を所定値に保つ出力光パワー制御手段 4 を備えたものであり、当該ラマン増幅器 9 の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器 10 を備えた光中継器。

21. 光ファイバ伝送路 8 中に挿入されて同光ファイバ伝送路 8 における損失をラマン増幅器 9 によって補償する光中継器であって、前記ラマン増幅器 9 は複数の励起光を発生する励起光発生手段 1 を備え、同励起光発生手段 1 から出力される複数の励起光と光ファイバ 2 に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段 1 はファブリペロー型、DFB 型、DBR 型の半導体レーザ又は MOPA 3 を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を 6nm 以上 35nm 以下とし、増幅用の光ファイバ 2 に非線形屈折率 n_2 が $3.5 \times 10^{-20} [\text{m}^2/\text{W}]$ 以上の光ファイバを用いたものであり、当該ラマン増幅器 9 の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器 10 を備えた光中継器。

22. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失をラマン増幅器9によって補償する光中継器であって、前記ラマン増幅器9は複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用の光ファイバ2が伝送路の一部として存在するものであり、当該ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備えた光中継器。

23. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失をラマン増幅器9によって補償する光中継器であって、前記ラマン増幅器9は複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラマン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用のファイバ2としてSMFと-20/ps/nm/km未満の分散を持つファイバを用いたものであり、当該ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備えた光中継器。

24. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失をラマン増幅器9によって補償する光中継器であって、前記ラマン増幅器9は複数の励起光を発生する励起光発生手段1を備え、同励起光発生手段1から出力される複数の励起光と光ファイバ2に伝播される信号光とを合波して当該信号光にラ

マン利得を与えるラマン増幅器であって、前記励起光発生手段1はファブリペロー型、DFB型、DBR型の半導体レーザ又はMOPA3を用いて構成し、各励起光はその中心波長を互いに異なるものとし、且つ中心波長の間隔を6nm以上35nm以下とし、増幅用の光ファイバ2を信号光を伝播するための伝送用ファイバから独立させて、同伝送用ファイバ中に挿入可能としたものであり、当該ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備えた光中継器。

25. 希土類添加ファイバ増幅器10の利得を一定に保ち、ラマン増幅器9の利得によって中継器の利得を調整する様にした請求の範囲第17項乃至第24項のいずれかに記載の光中継器。

26. 希土類添加ファイバ増幅器10の利得の波長依存性をラマン増幅器9の利得の波長依存性を使って補償する様にした請求の範囲第17項乃至第24項のいずれかに記載の光中継器。

27. 光ファイバ伝送路8中に挿入されて同光ファイバ伝送路8における損失と波長分散を補償する光中継器であって、波長合波していない励起光を用いたラマン増幅器9を備え、同ラマン増幅器9の前段又は後段又は前後両段に希土類添加ファイバ増幅器10を備えることを特徴とし、ラマン増幅器9の増幅用の光ファイバ2に分散補償用ファイバを用いた光中継器。

28. 請求の範囲第27項記載の光中継器において、希土類添加ファイバ増幅器10の利得を一定に保ち、ラマン増幅器9の利得によって中継器の利得を調整する様にした光中継器。

29. 中心波長が異なる2以上の励起光と信号光とをラマン増幅媒体である光ファイバに伝播して、前記信号光をラマン増幅するためのラマン増幅方法において、中心波長が短い励起光ほど光パワーを高くするラマン増幅方法。

30. 中心波長が異なる2以上の励起光と信号光とをラマン増幅媒体である光ファイバに伝播して、前記信号光をラマン増幅するためのラマン増幅方法において、2以上の励起光の最短中心波長と最長中心波長の中心よりも短波長側の励起光のトータル光パワーを長波長側の励起光のトータル光パワーよりも高くするラマン増幅方法。

31. 中心波長が異なる3以上の励起光と信号光とをラマン増幅媒体である光ファイバに伝播して、前記信号光をラマン増幅するためのラマン増幅方法において、3以上の励起光の最短中心波長と最長中心波長の中心よりも短波長側に中心波長をもつ励起光源の数が長波長側に中心波長をもつ励起光源の数よりも多く、短波長側の励起光のトータル光パワーが長波長側の励起光のトータル光パワーよりも大きいラマン増幅方法。

THIS PAGE BLANK (USPTO)

FIG. 1

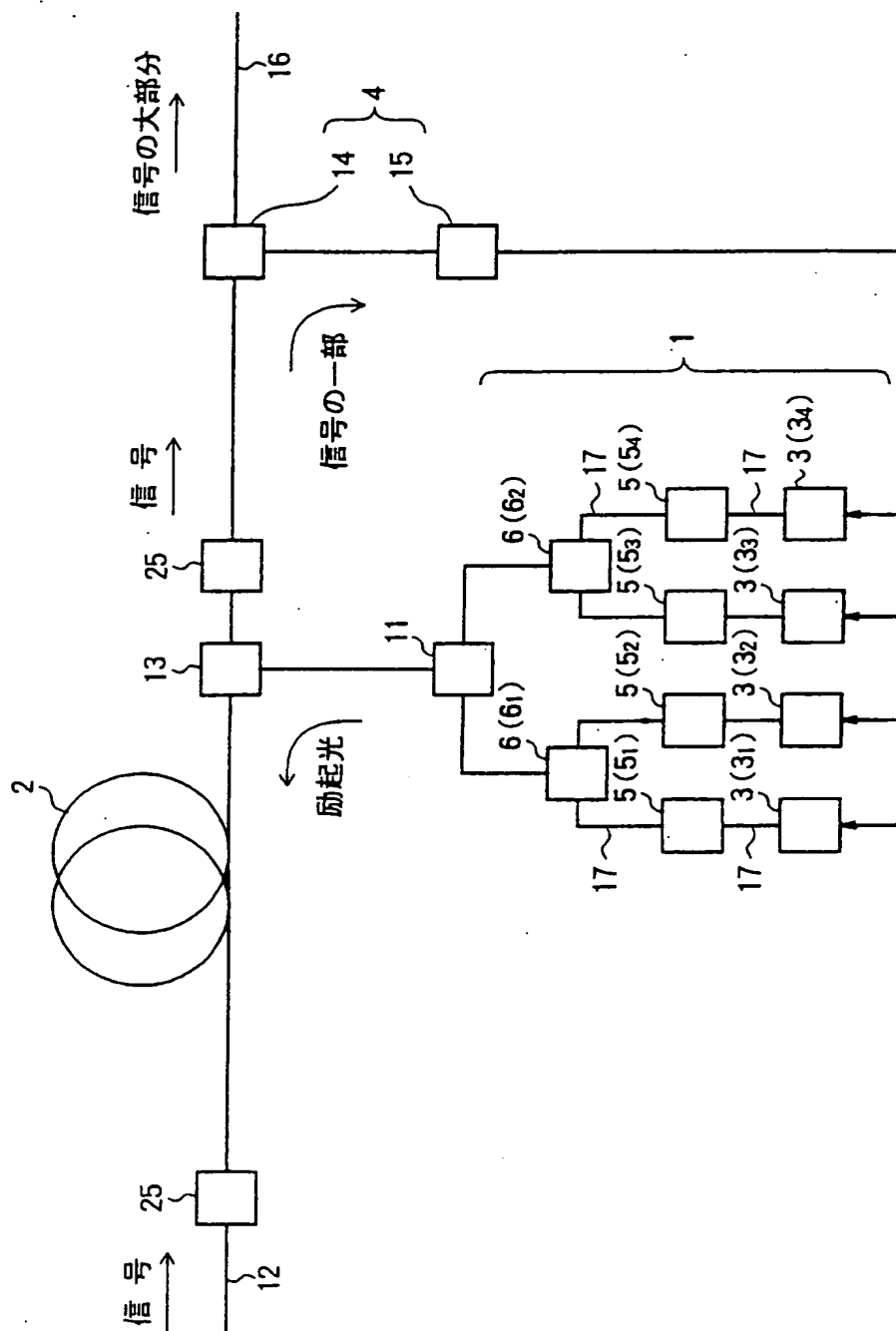


FIG. 2

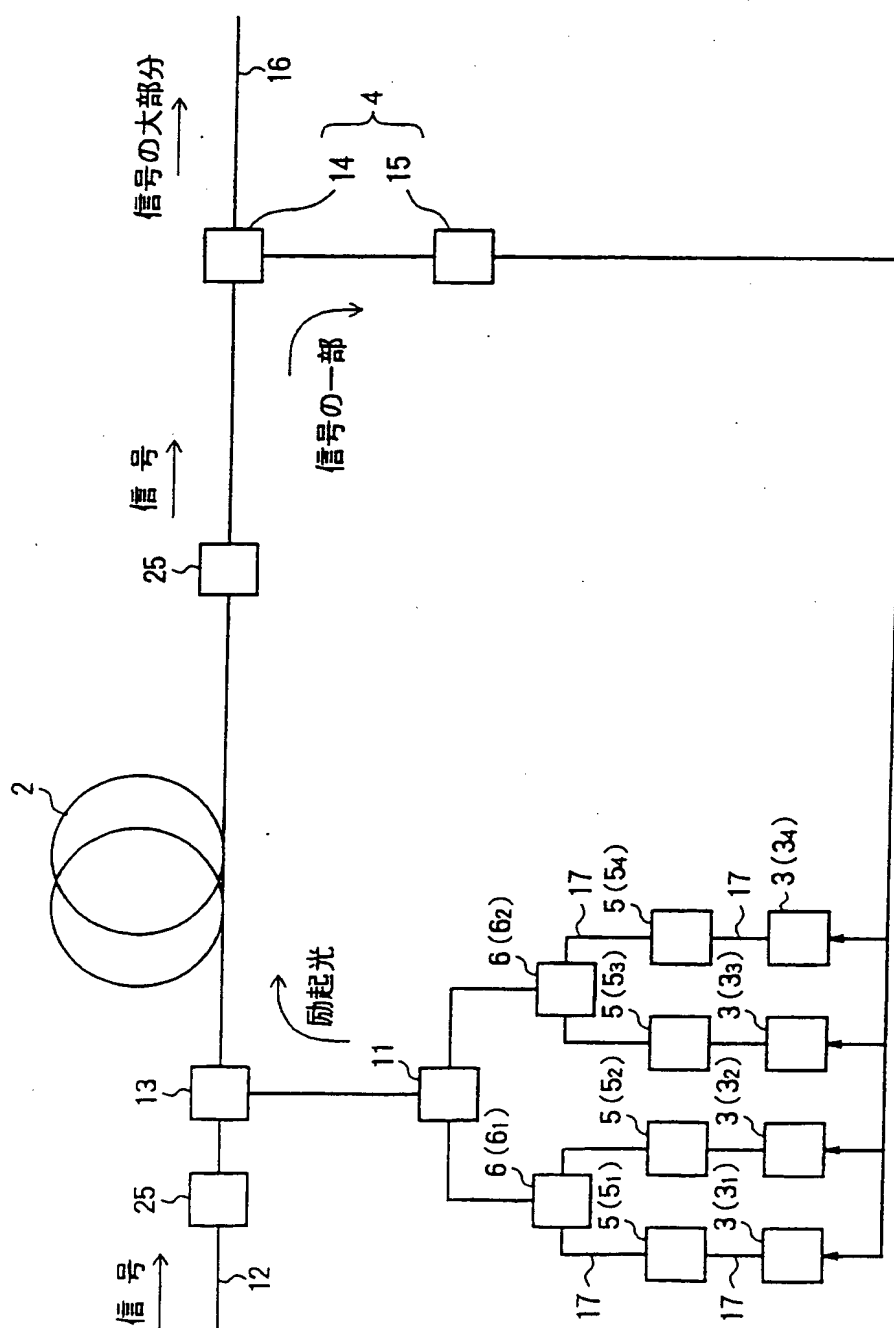


FIG. 3

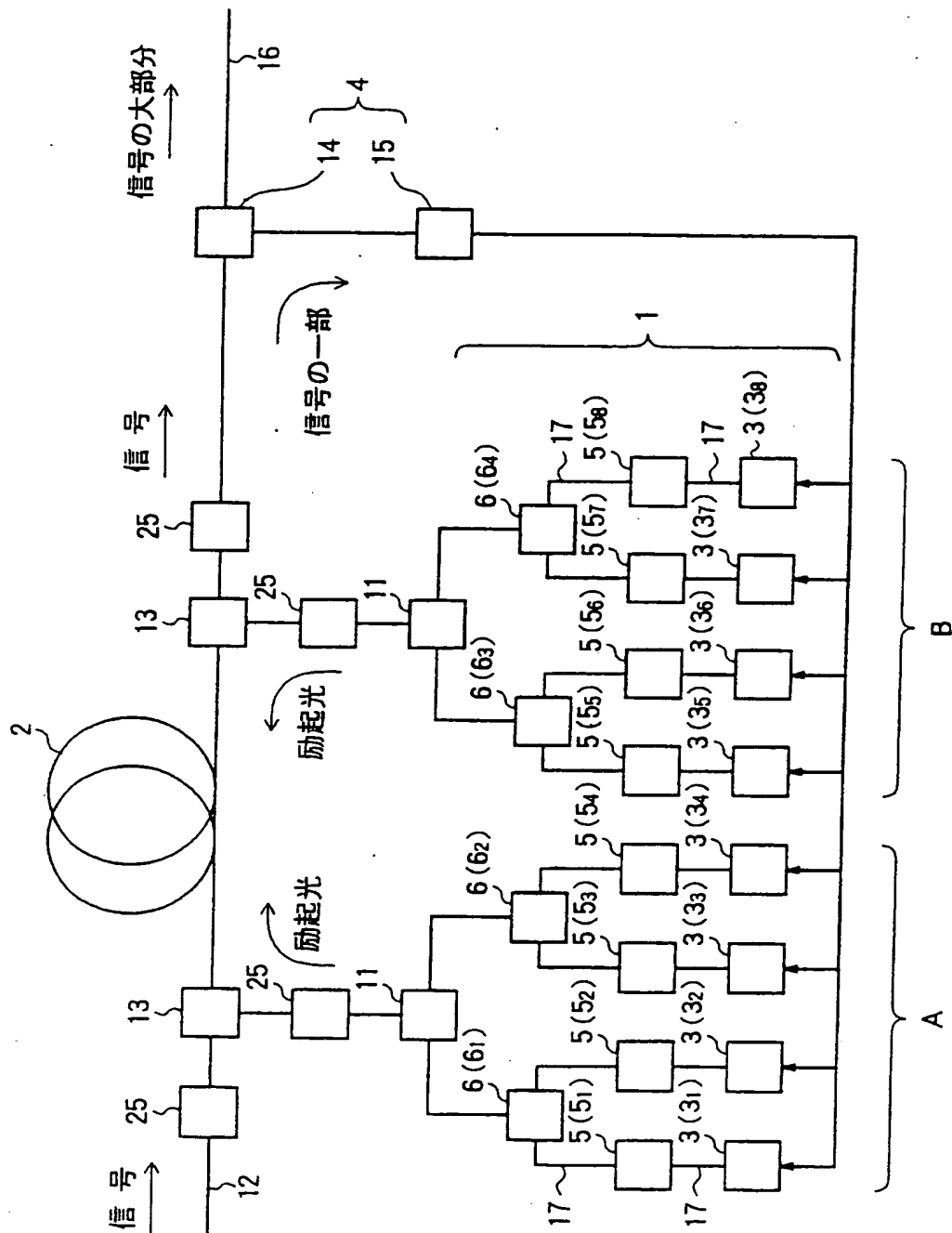
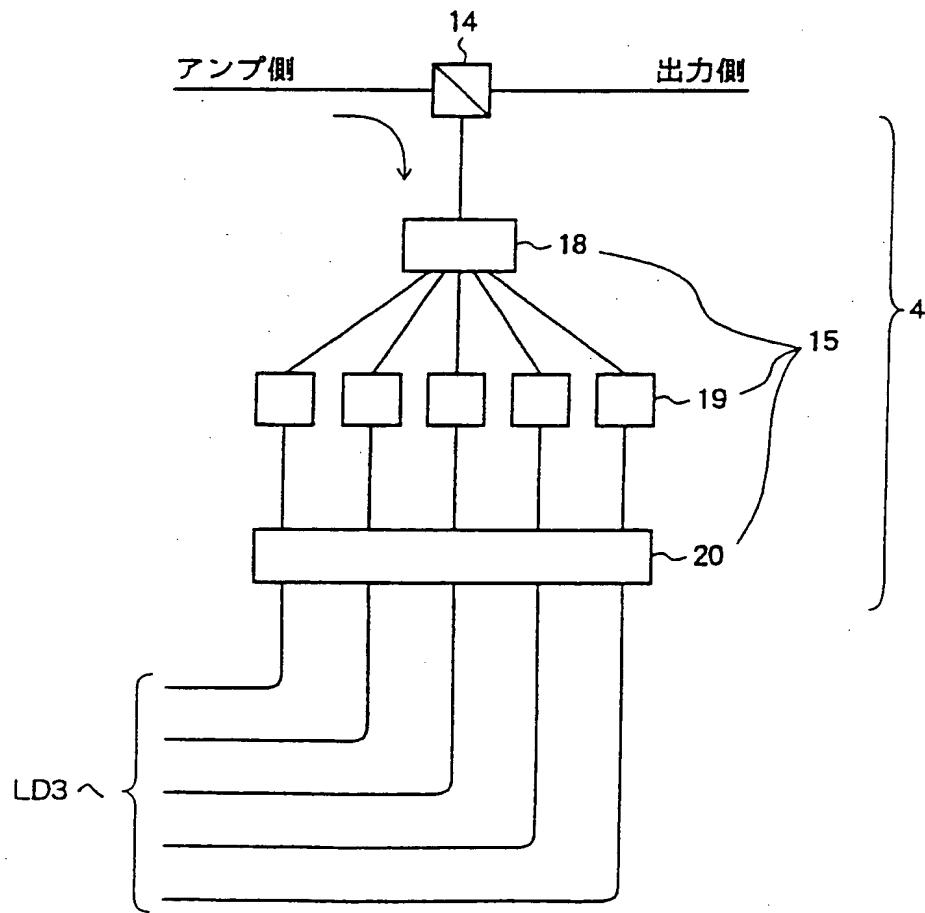


FIG. 4



5 / 45

FIG. 5

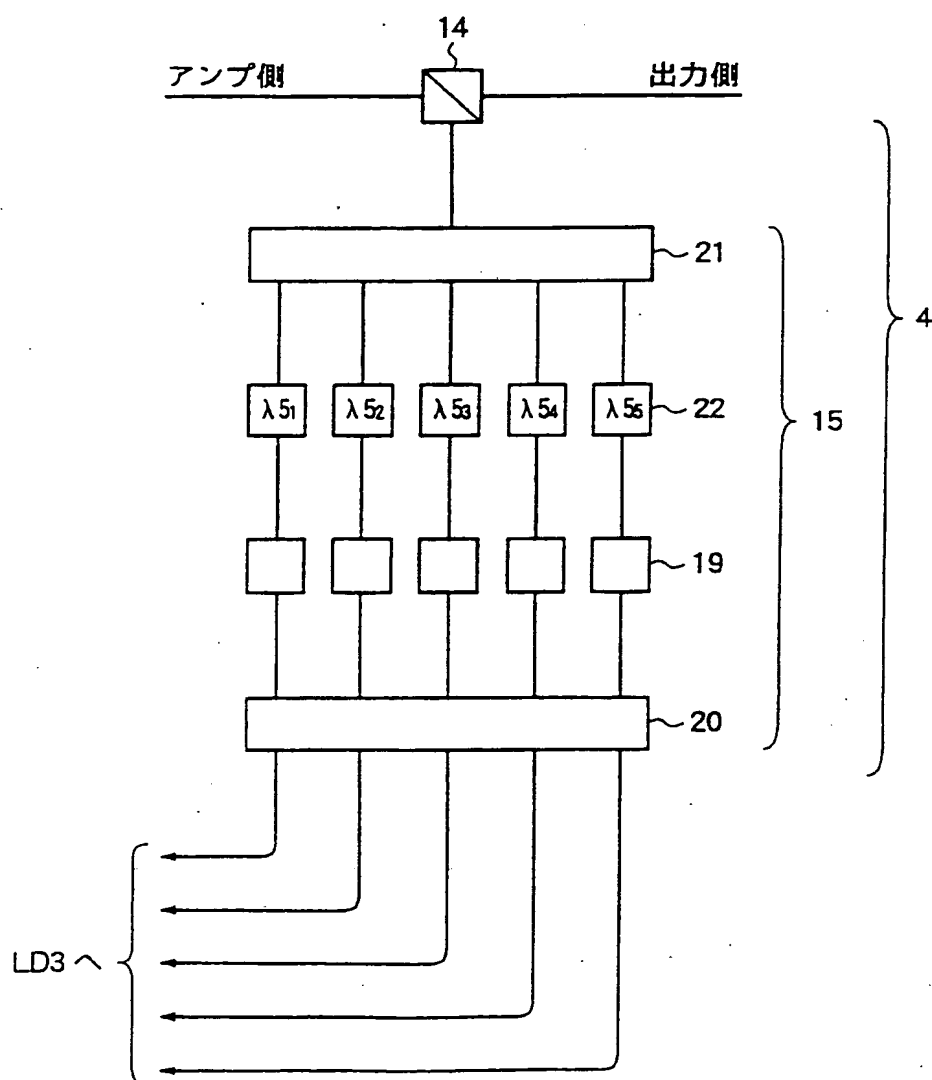


FIG. 6A

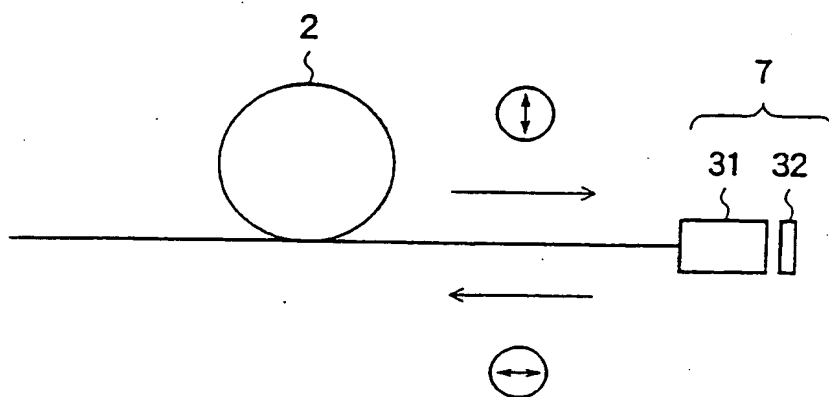


FIG. 6B

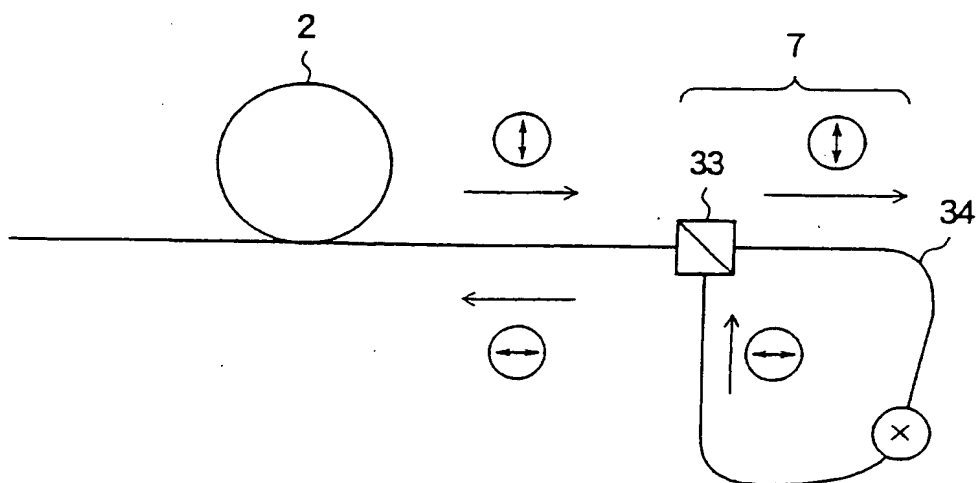


FIG. 7

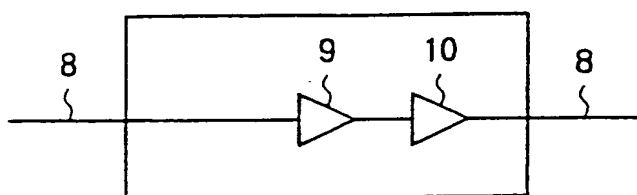


FIG. 8

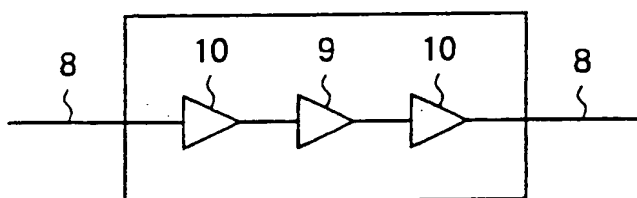


FIG. 9

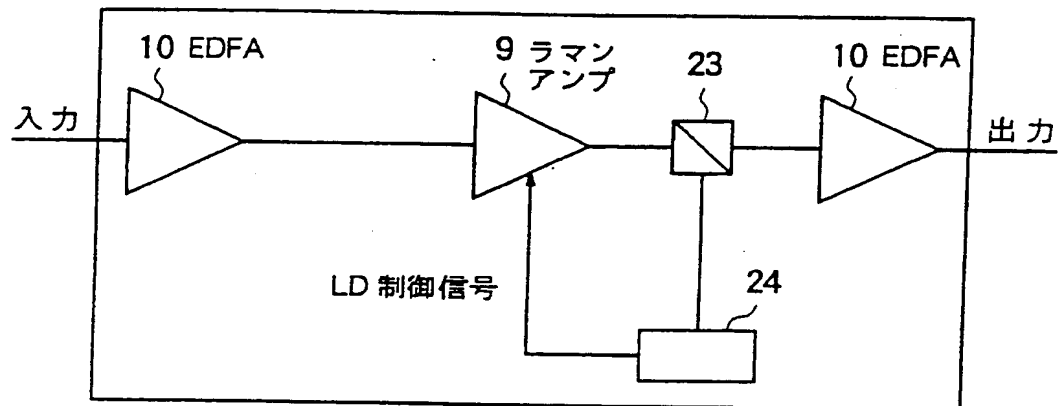


FIG. 10

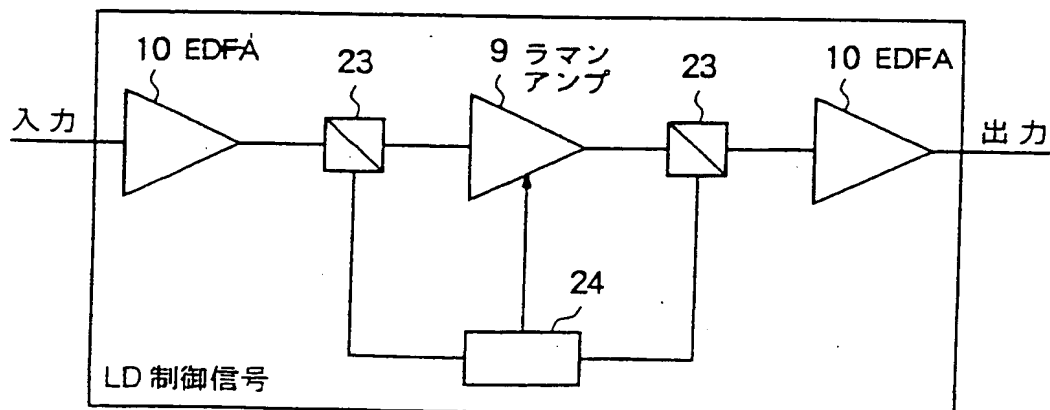
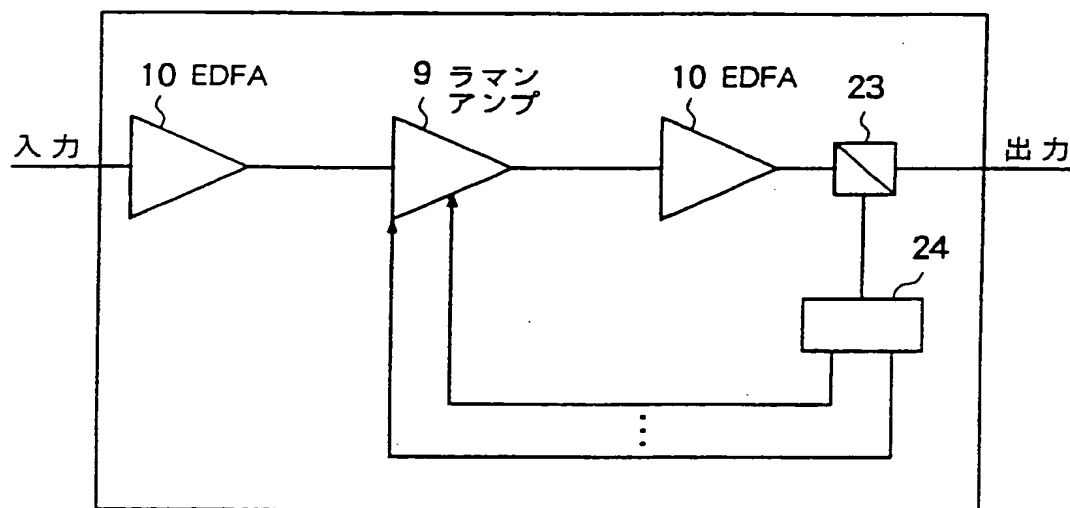


FIG. 11



10/45

FIG. 12

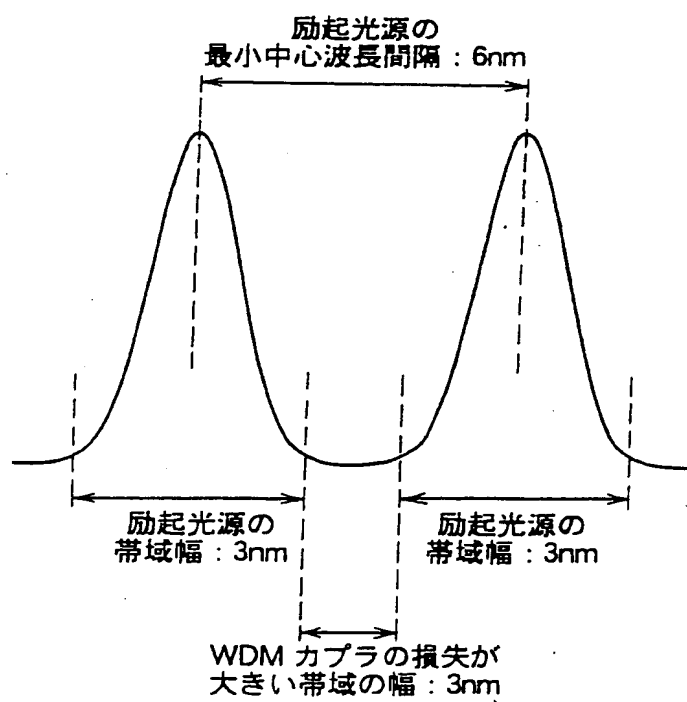


FIG. 13

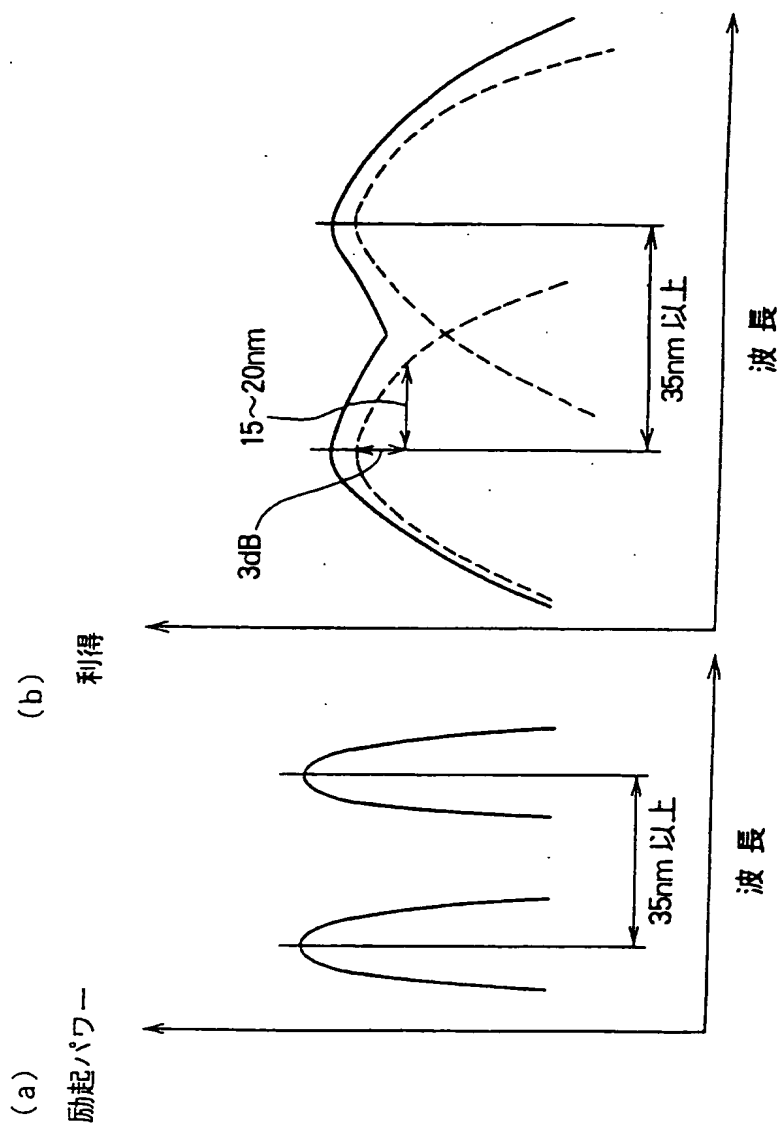
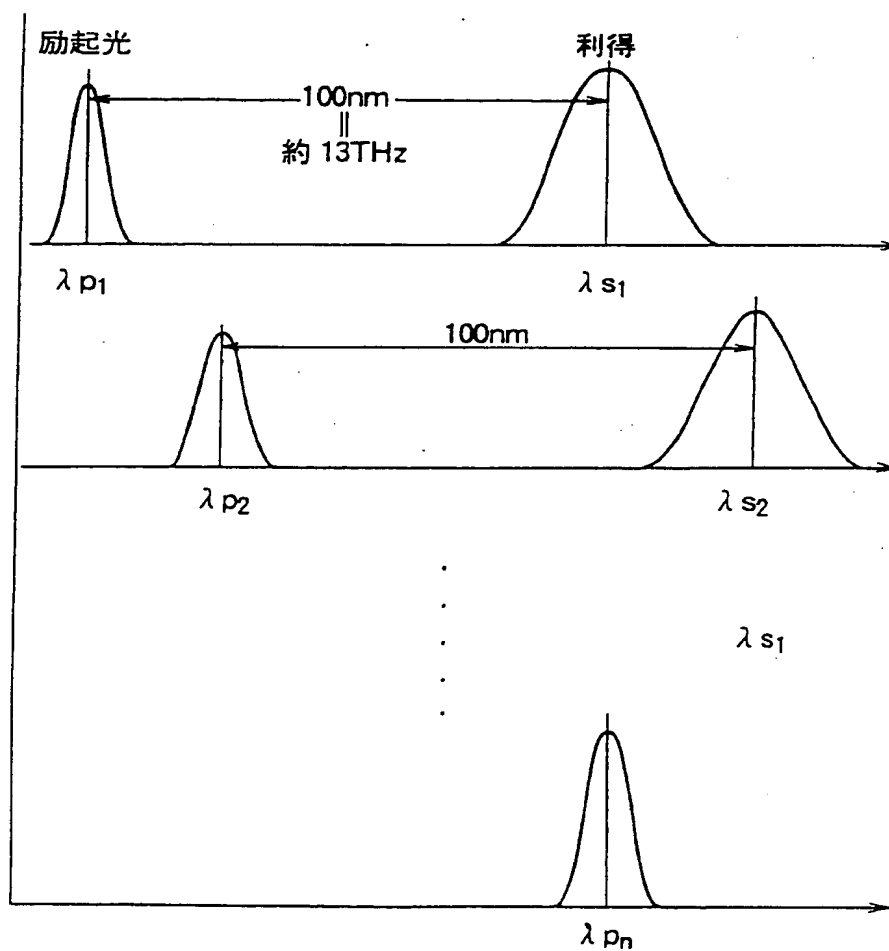


FIG. 14



重ならないためには $\lambda_{pn} < \lambda_{s1}$



$$\lambda_{pn} - \lambda_{p1} < 100\text{nm}$$

FIG. 15

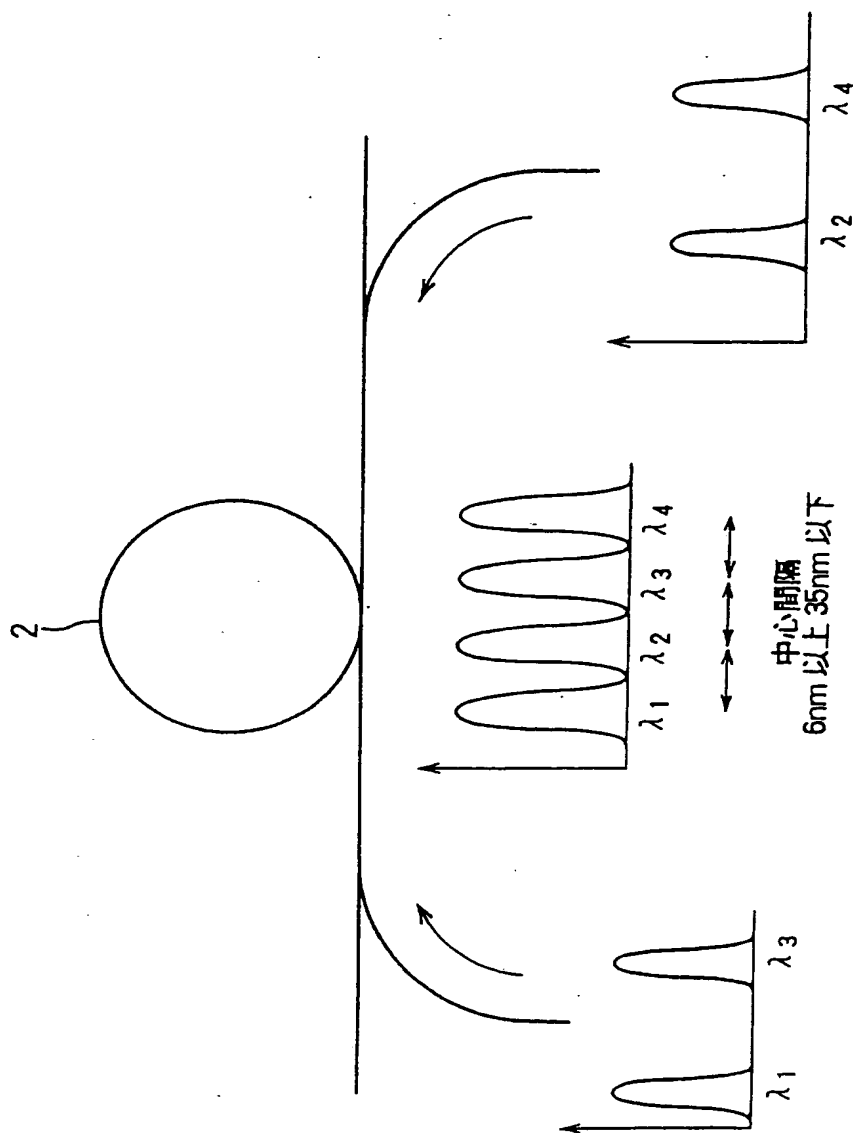
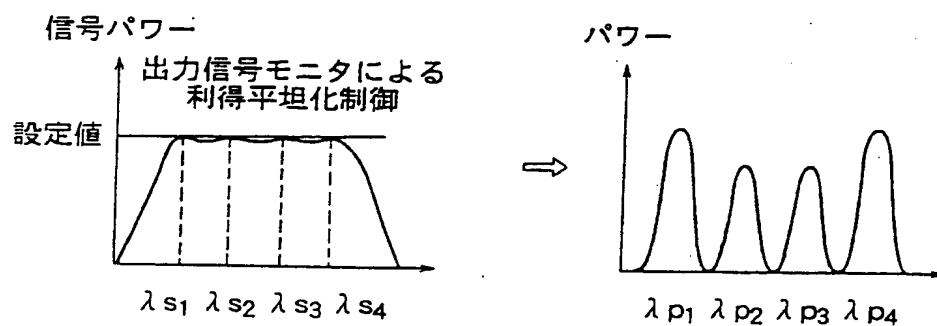


FIG. 16



$$\lambda_{s1} \approx \lambda_{p1} + 100\text{nm}$$

$$\lambda_{s2} \approx \lambda_{p2} + 100\text{nm}$$

$$\lambda_{s3} \approx \lambda_{p3} + 100\text{nm}$$

$$\lambda_{s4} \approx \lambda_{p4} + 100\text{nm}$$

FIG. 17A

| 中継器仕様 | ① | ② | ③ |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 中継器入力 P_{in} [dBm/ch] | -20 ± 3 | -15 ± 2 | -15 ± 1 |
| 中継器出力 P_{out} [dBm/ch] | 10 | 10 | 5 |
| DCF 損出 L_d [dB] | 10 ± 2 | 8 ± 1.5 | 6 ± 1 |

FIG. 17B

| EDFA 設計例 | ① | ② | ③ |
|---------------------|------------|--------------|------------|
| 増幅器 1 利得 G_1 [dB] | 20 ± 3 | 15 ± 2 | 15 ± 1 |
| 増幅器 2 利得 G_2 [dB] | 20 ± 2 | 18 ± 1.5 | 11 ± 1 |
| 中継器利得 G_r [dB] | 30 ± 3 | 25 ± 2 | 20 ± 1 |

FIG. 18

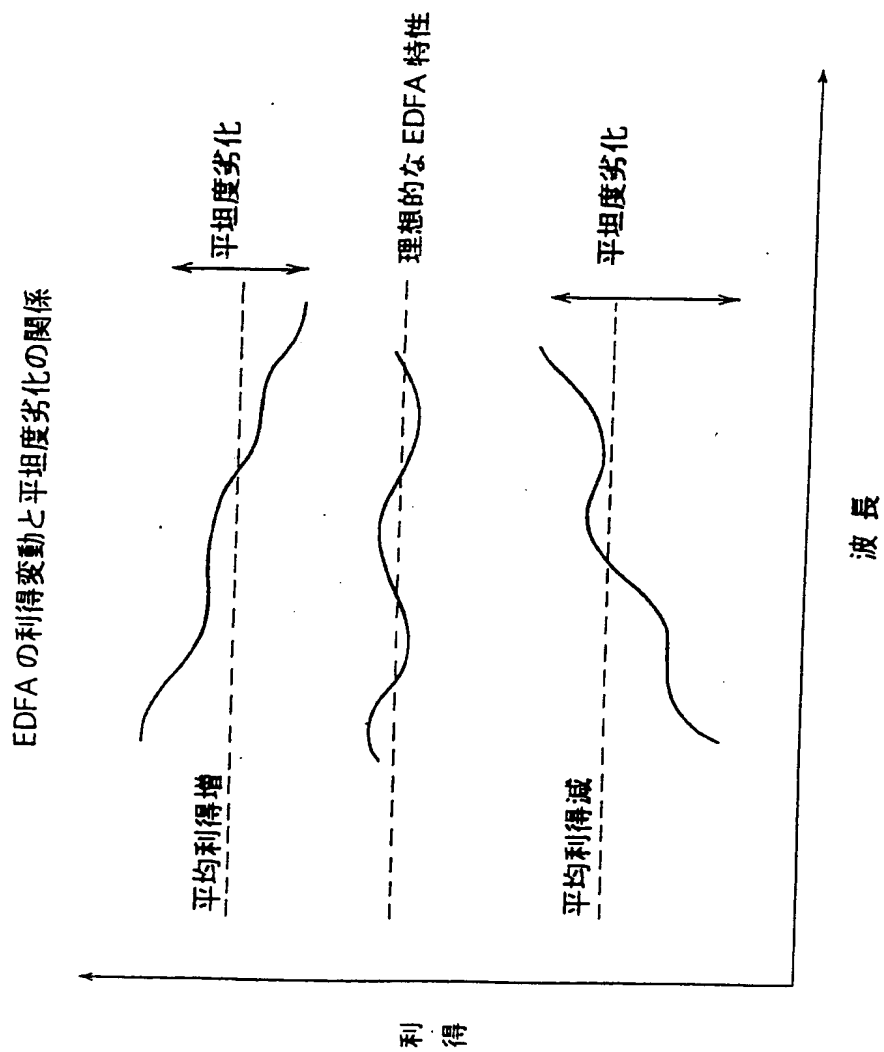


FIG. 19A

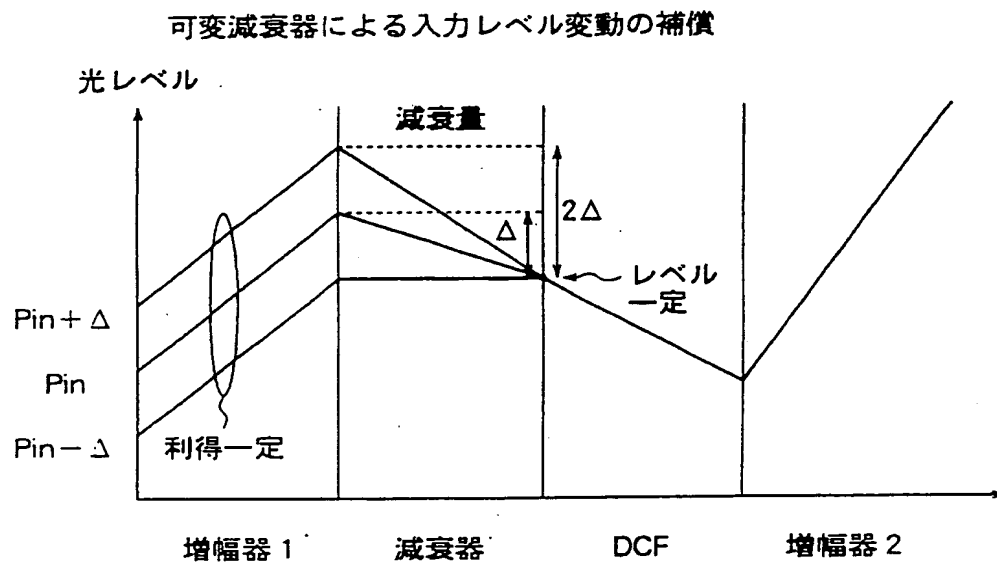
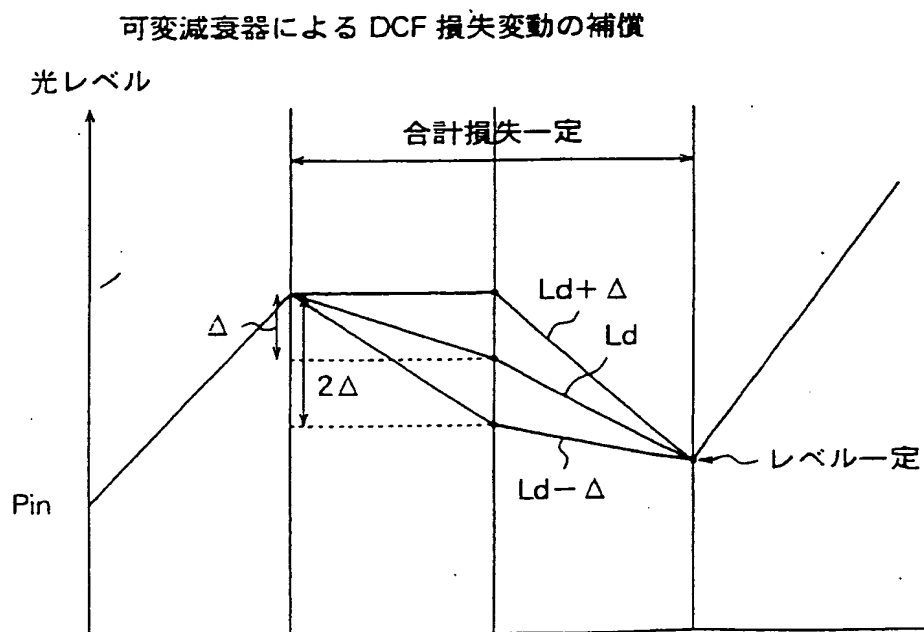


FIG. 19B



18/45

FIG. 20A

| 仕 様 | ① | ② | ③ |
|--------|-------------|-------------|-------------|
| 中継器入力 | -20 ± 3 | -15 ± 2 | -15 ± 1 |
| 中継器出力 | $+10$ | $+10$ | $+5$ |
| DCF 損出 | 10 ± 2 | 8 ± 1.5 | 6.5 ± 1 |

FIG. 20B

| | | | |
|-------|------------|--------------|------------|
| 増幅器 1 | 13 | 13 | 13 |
| 増幅器 2 | 10 | 10 | 10 |
| ラマン利得 | 17 ± 5 | 10 ± 3.5 | 3 ± 2 |
| 中継器利得 | 30 ± 3 | 25 ± 2 | 20 ± 1 |

FIG. 21A

ラマン増幅効果による入力レベル変動の補償

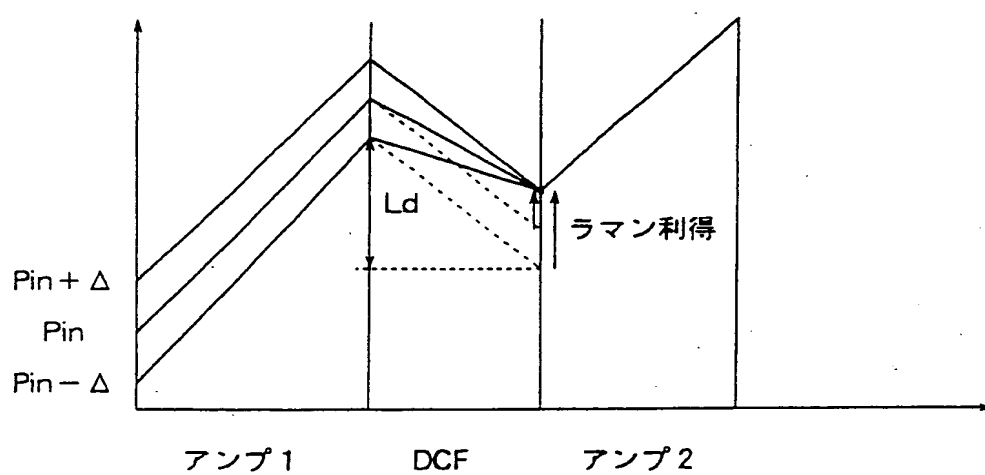
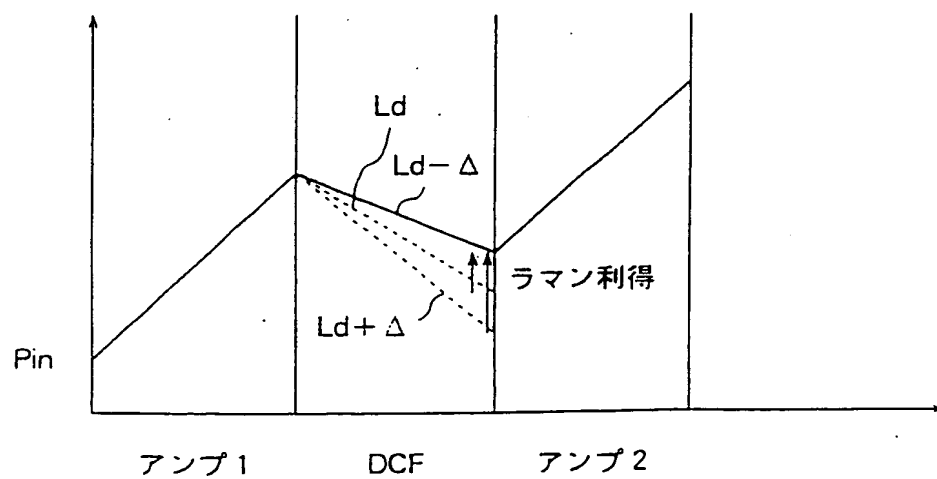


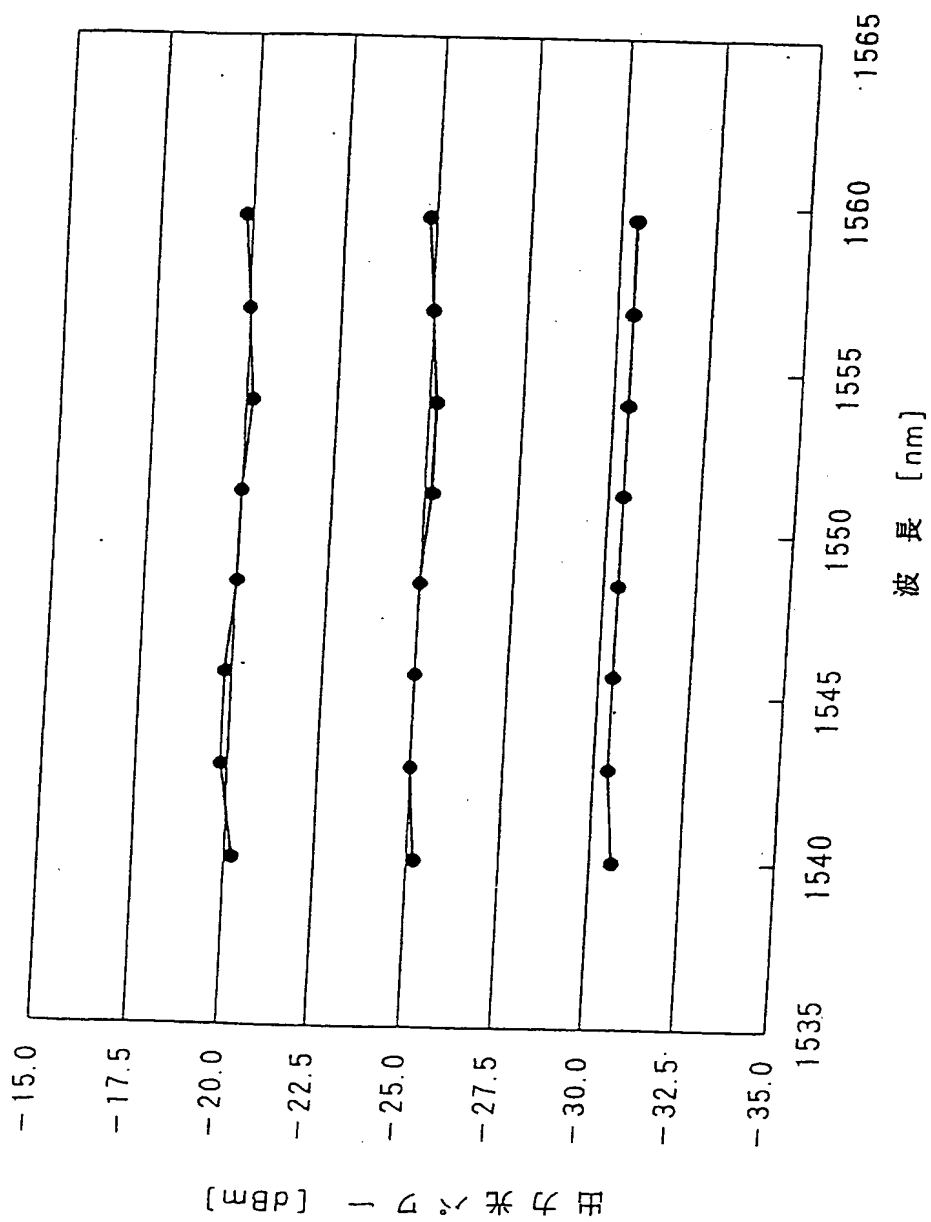
FIG. 21B

ラマン増幅効果による DCF 損失変動の補償



20/45

FIG. 22



21/45

FIG. 23

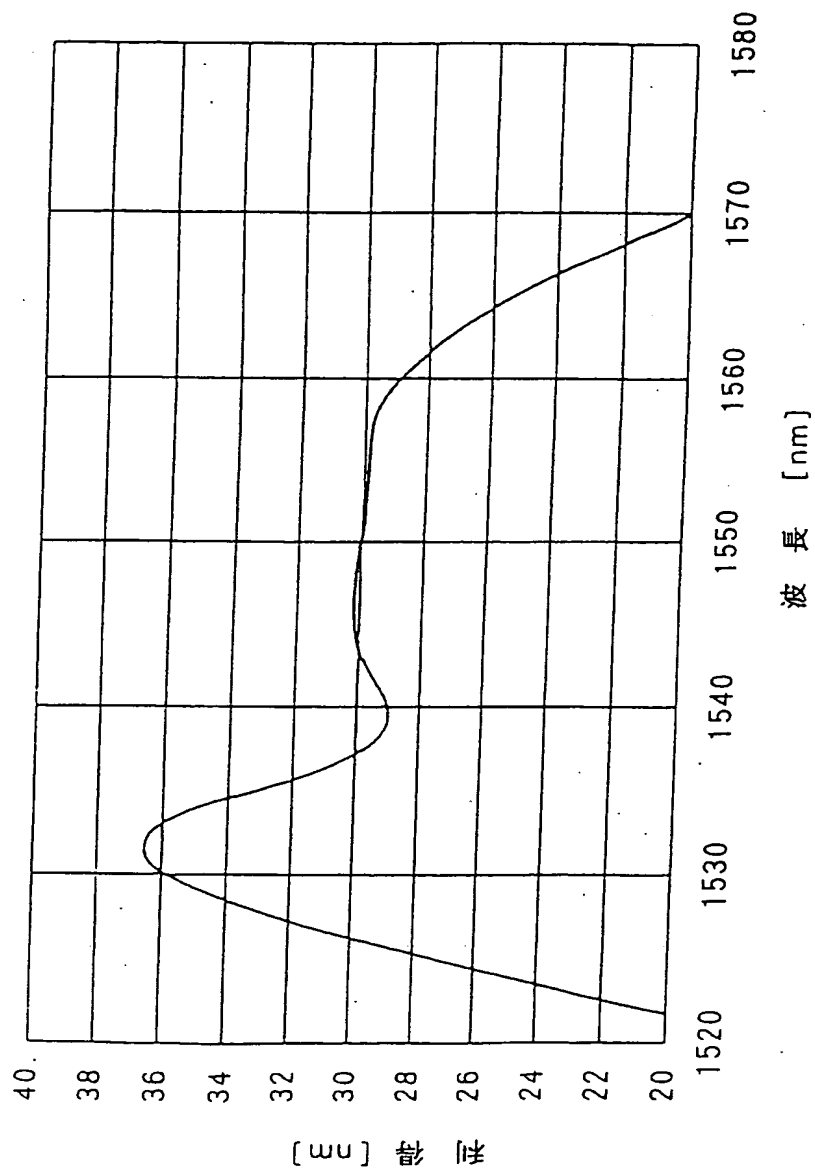


FIG. 24

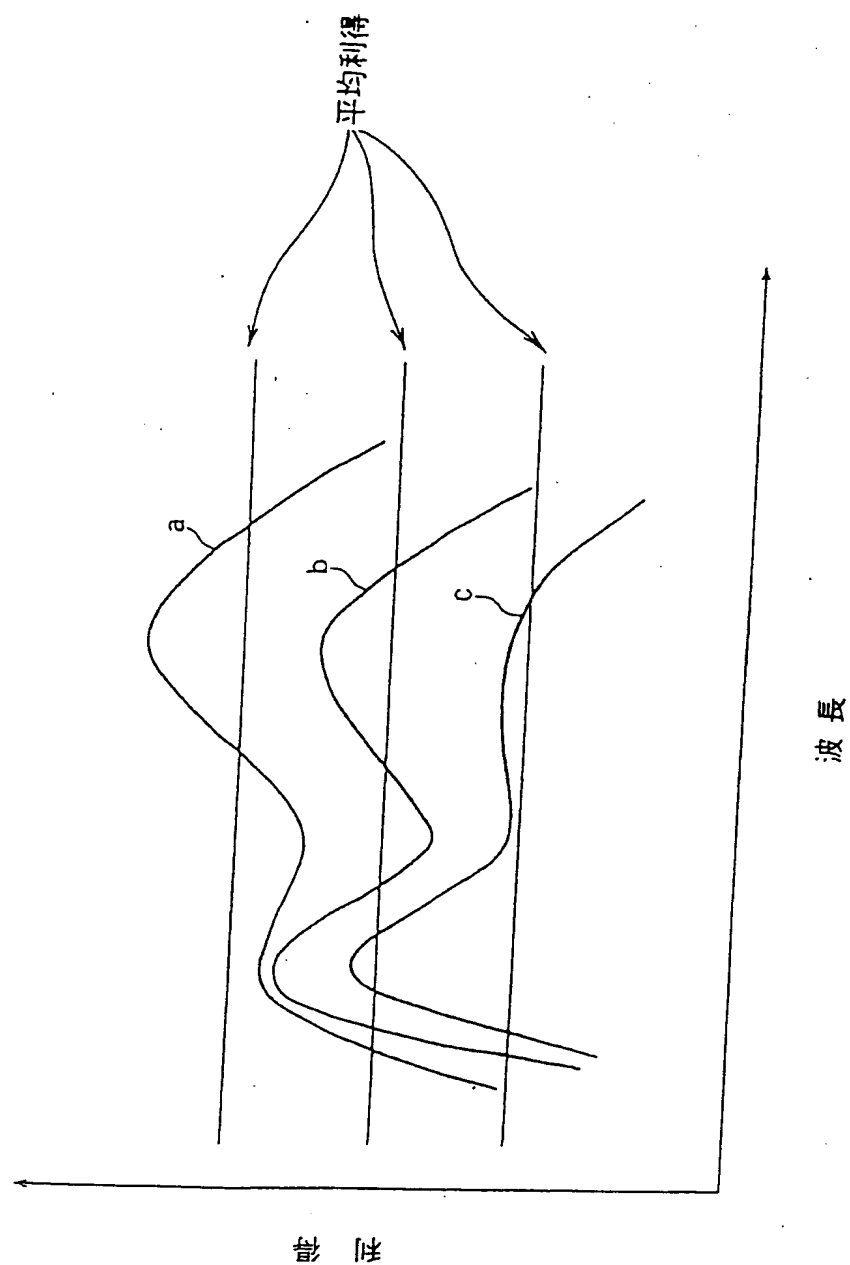


FIG. 25

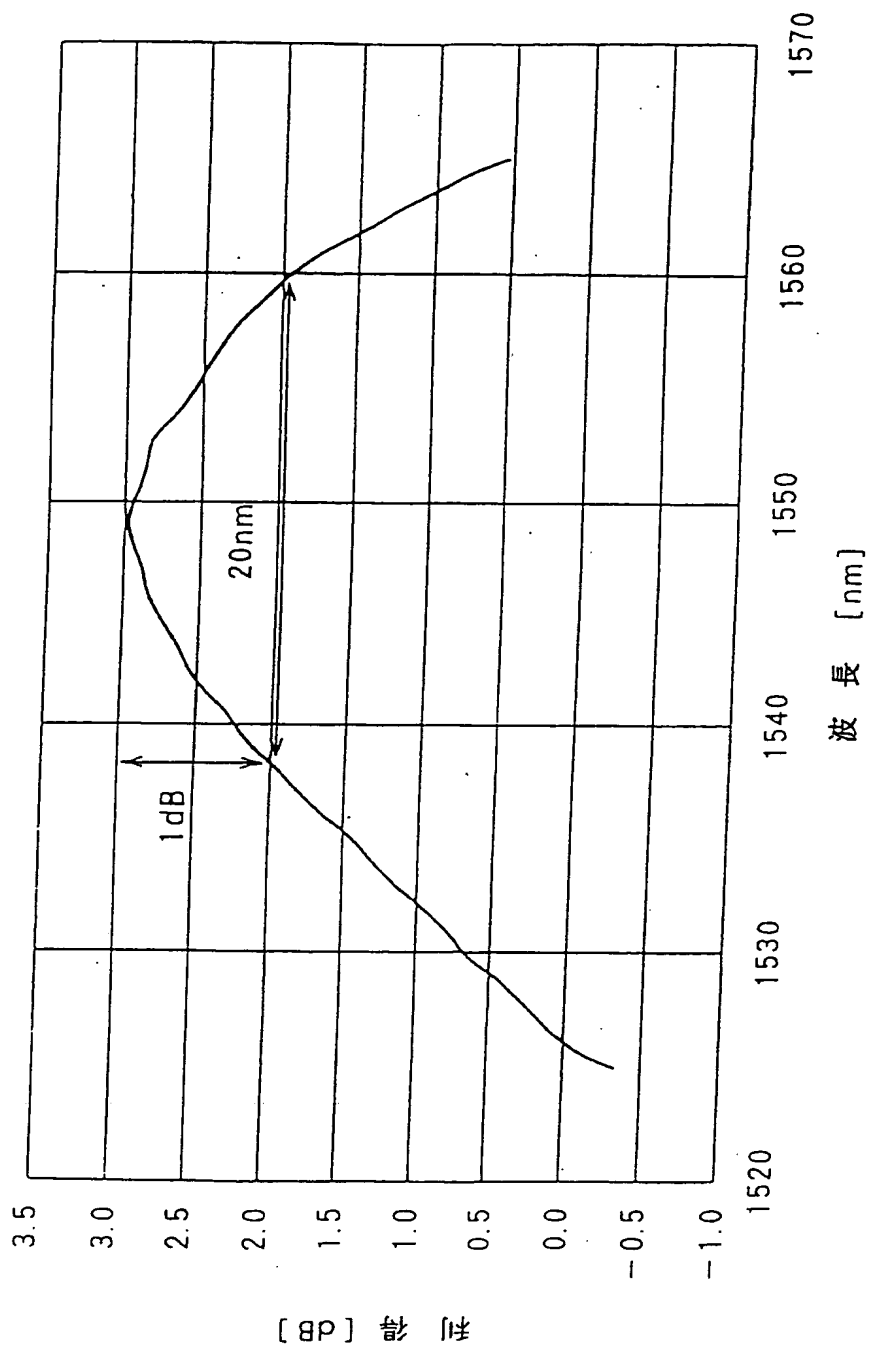


FIG. 26

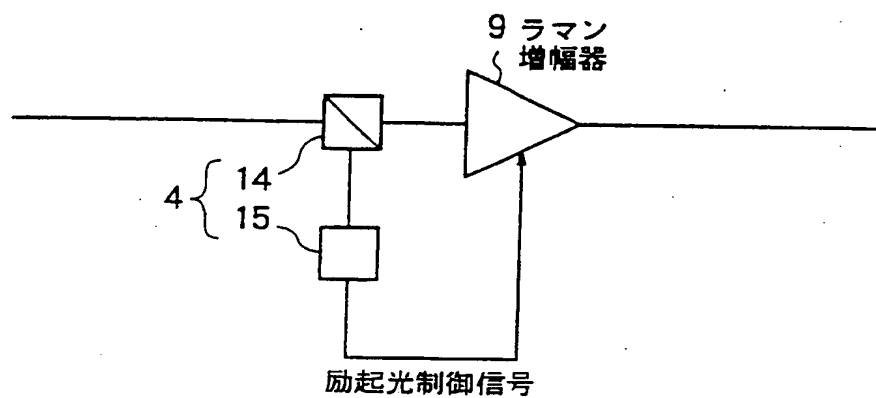


FIG. 27

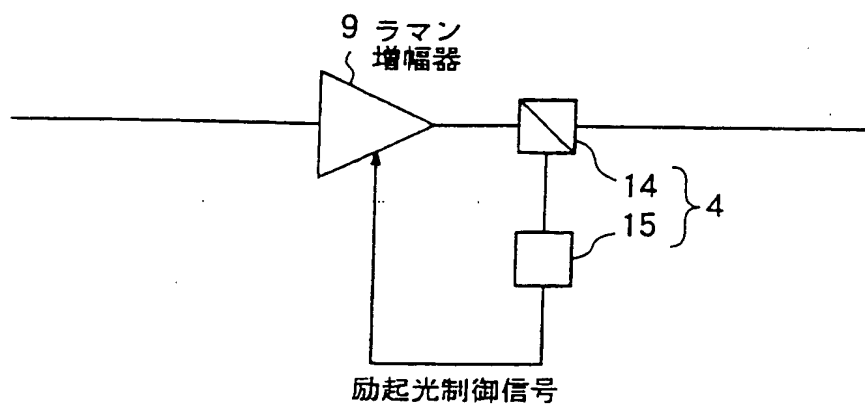


FIG. 28

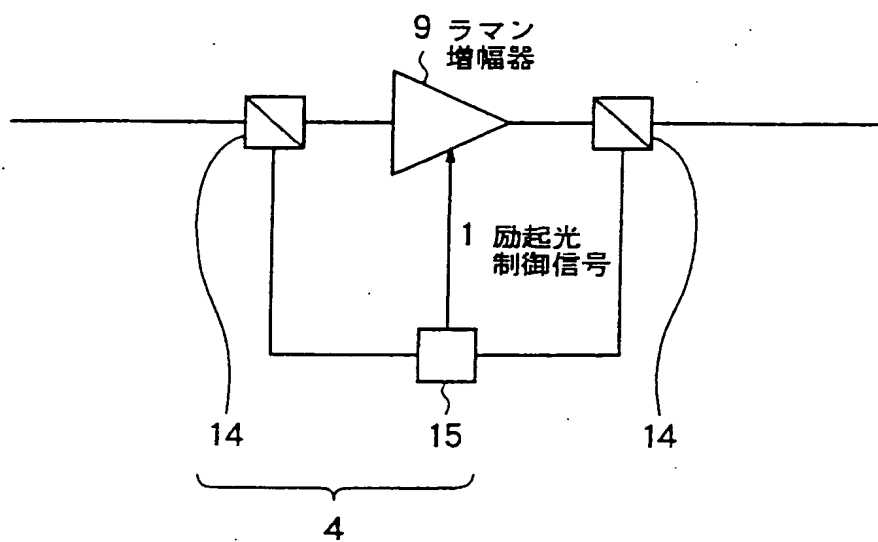


FIG. 29

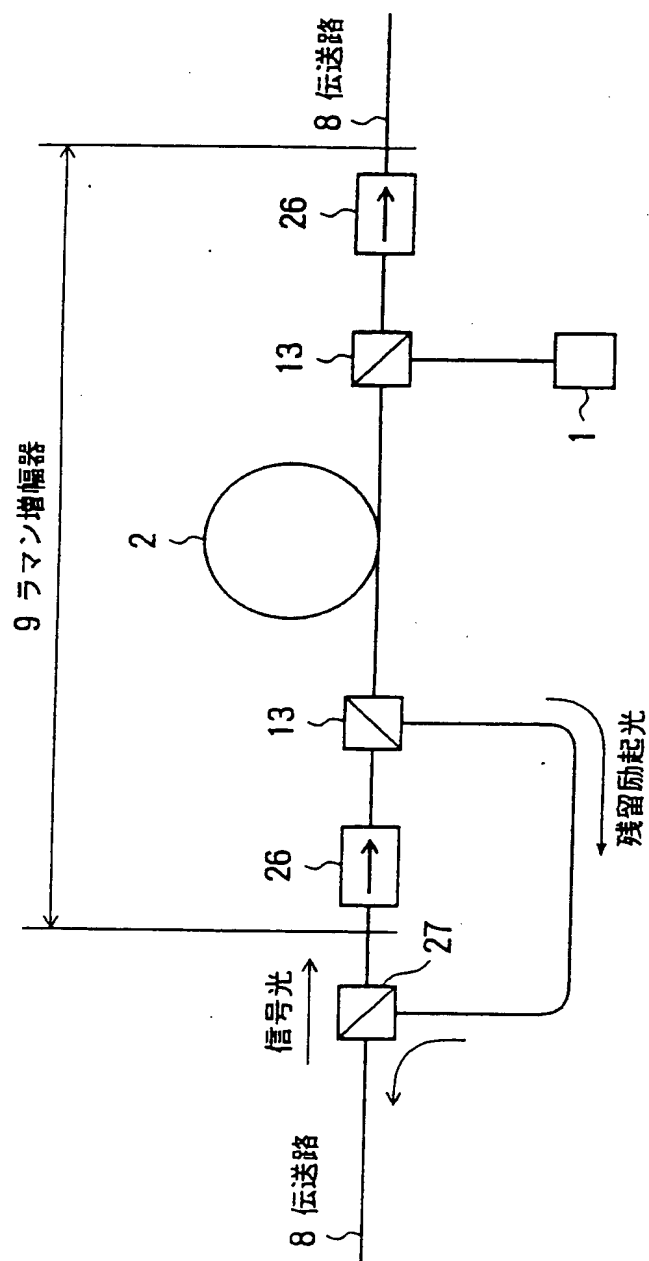


FIG. 30

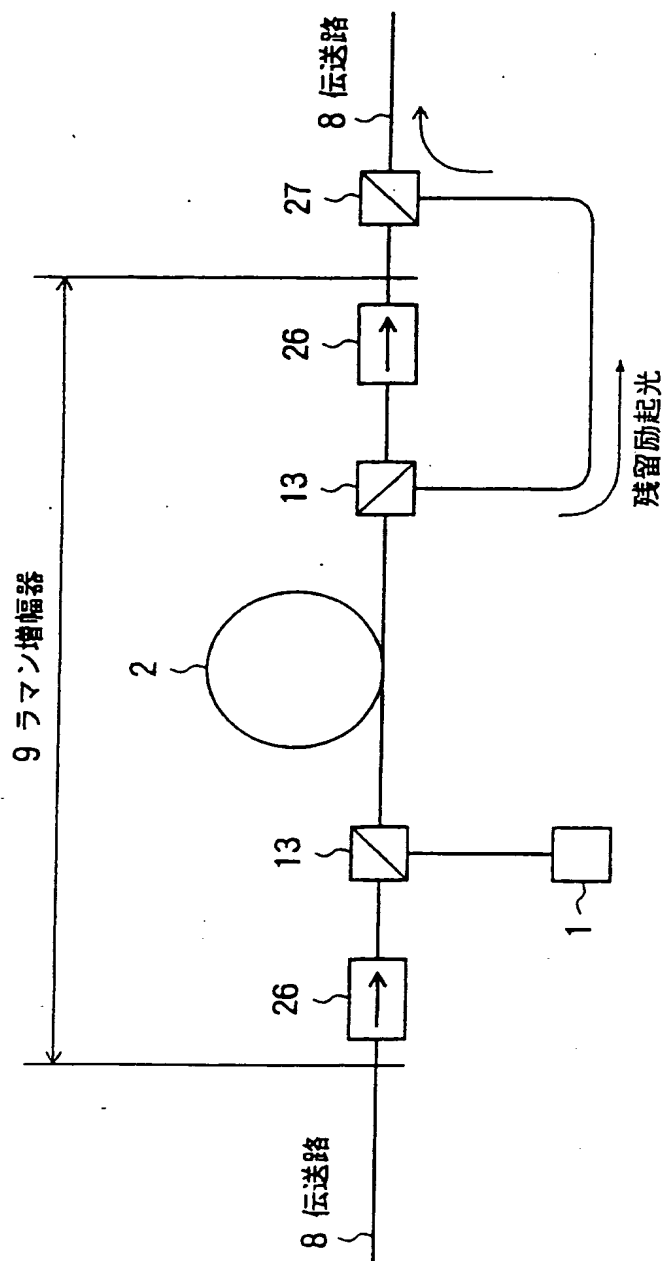


FIG. 31

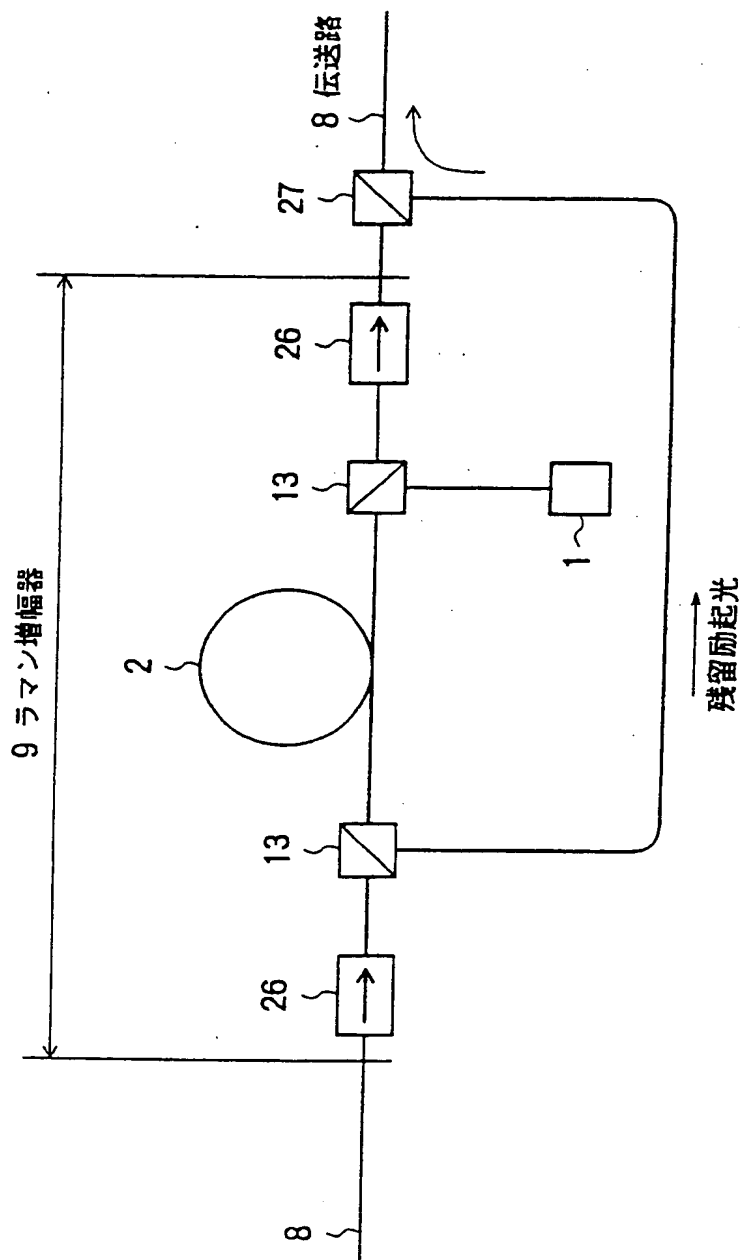


FIG. 32

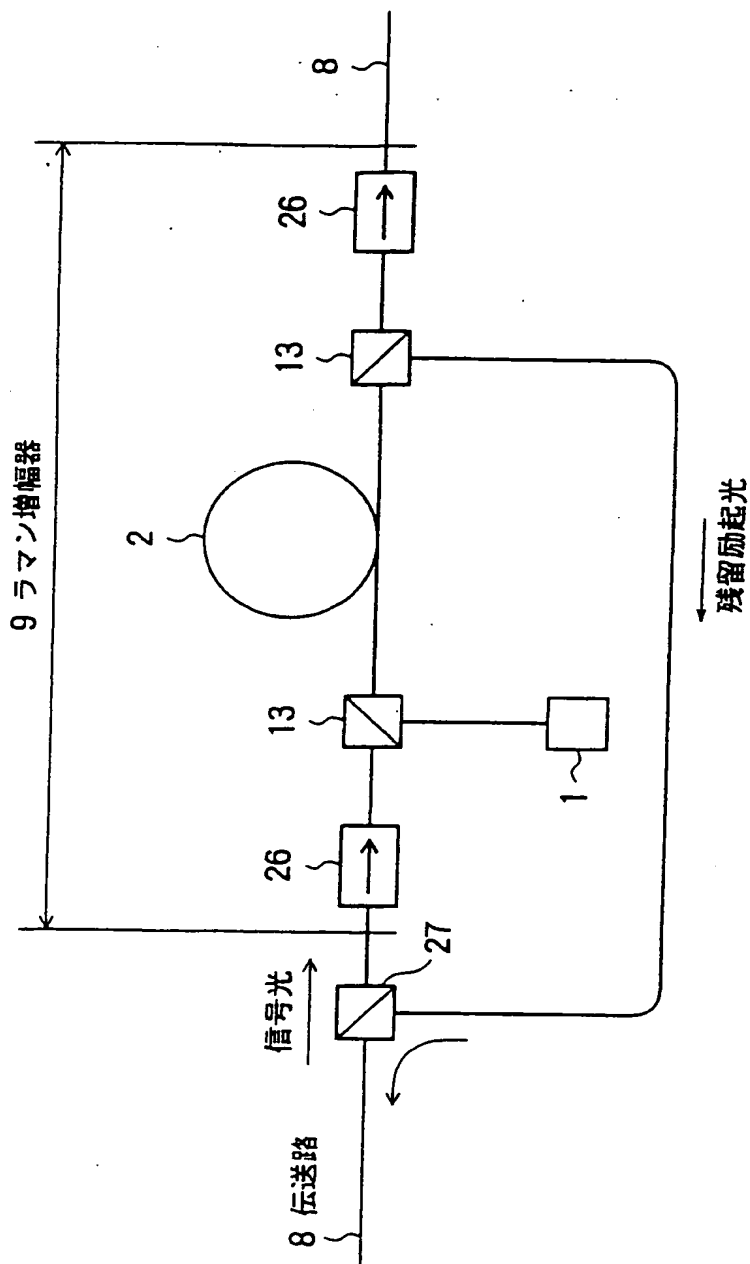
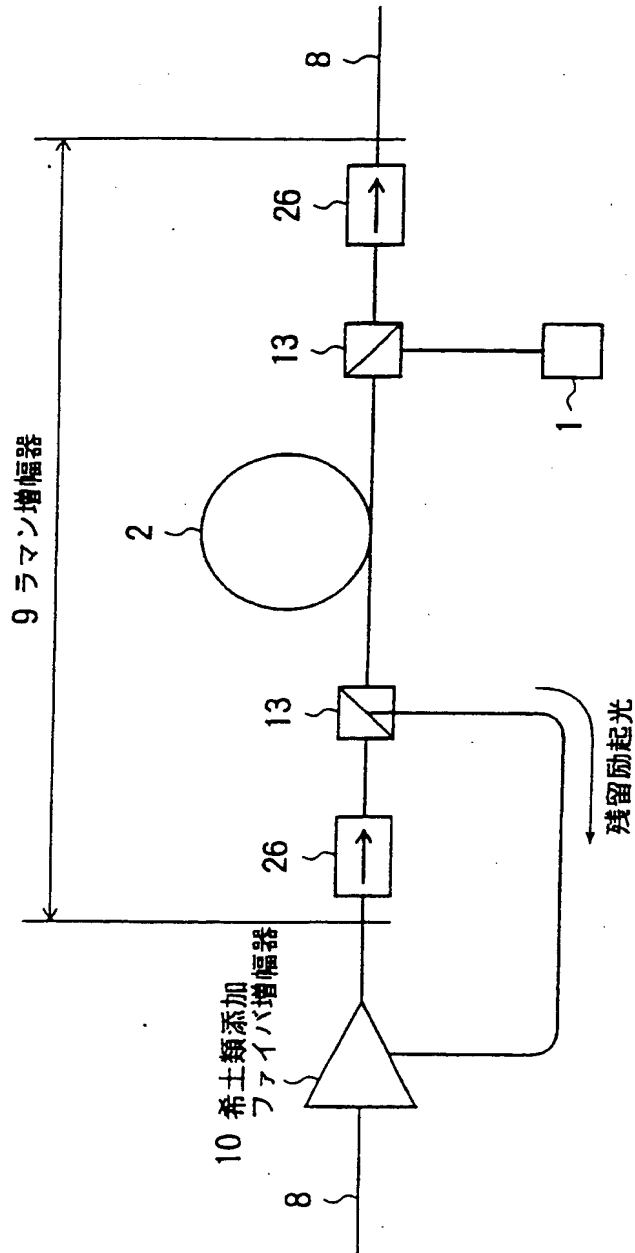
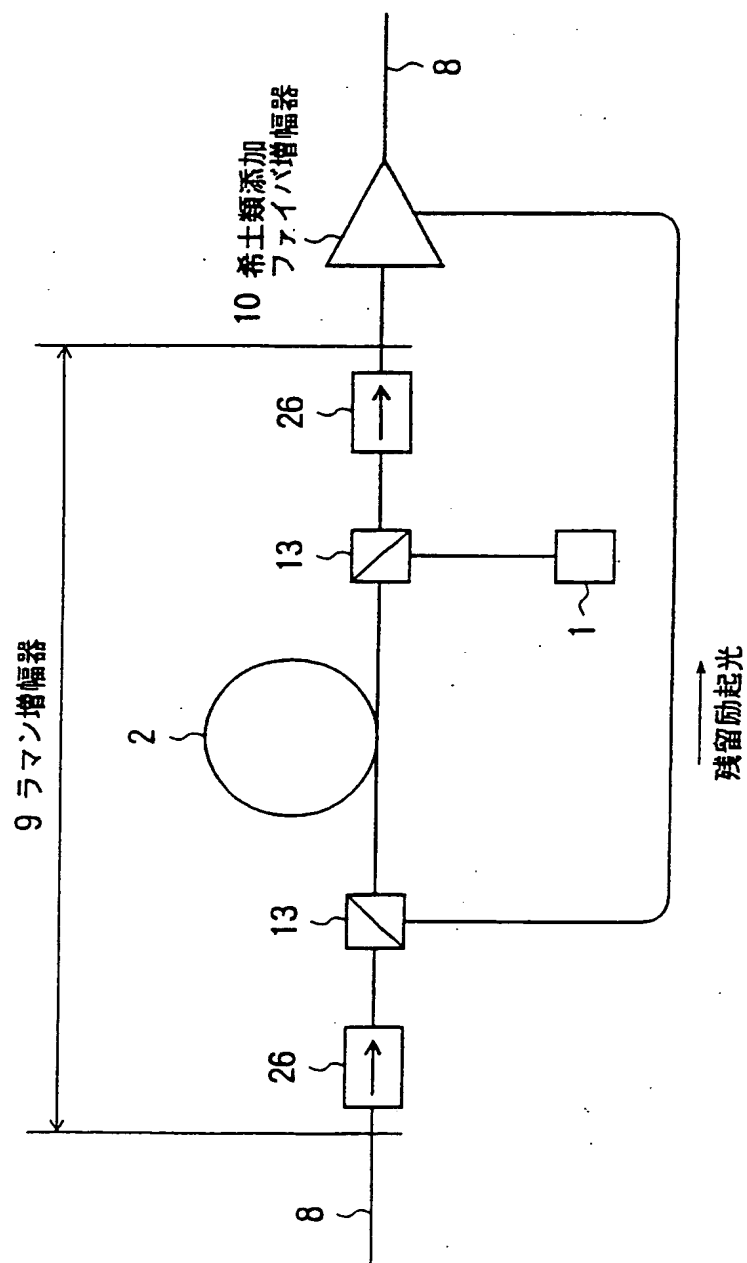


FIG. 33



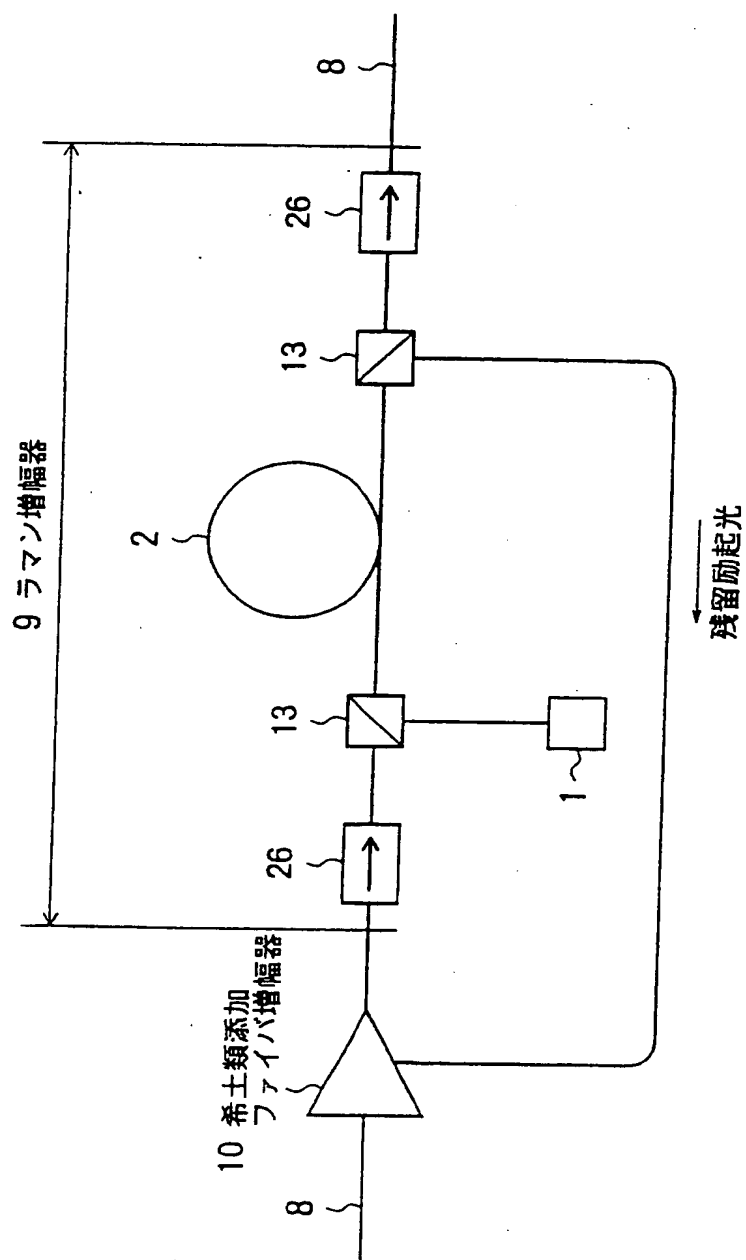
31/45

FIG. 34



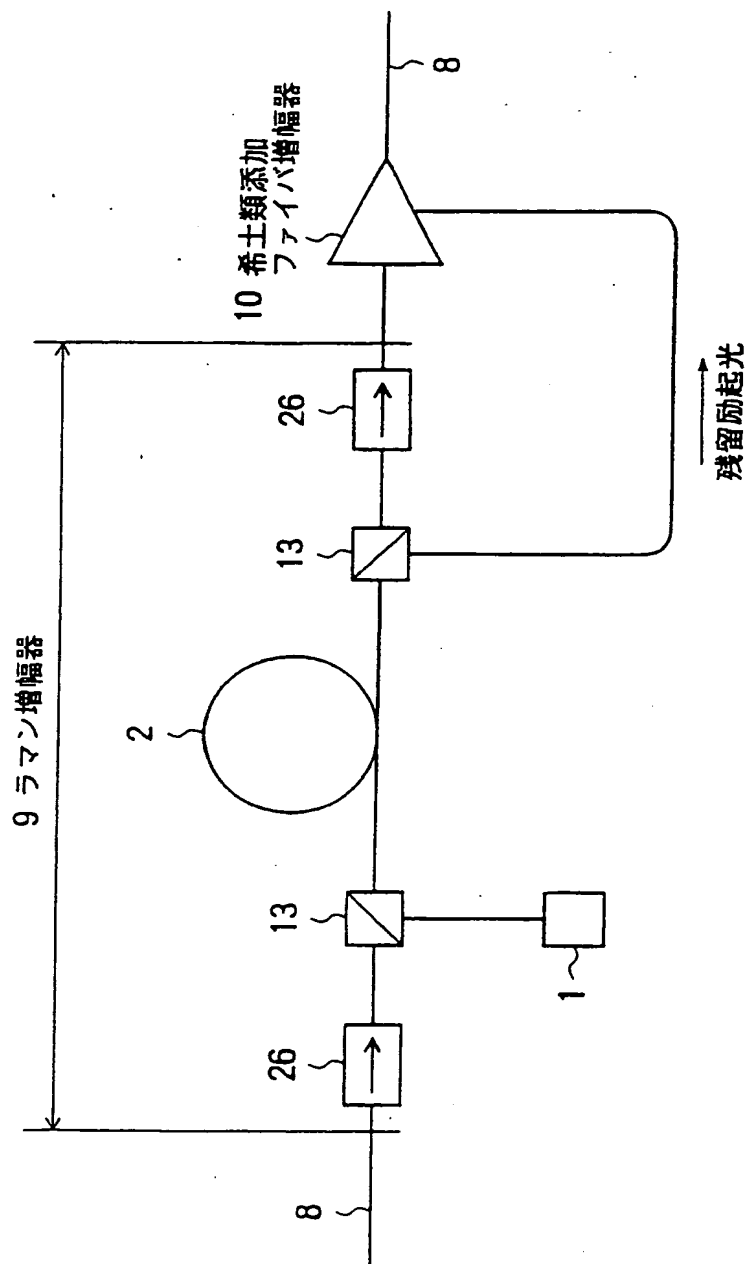
32 / 45

FIG. 35



33/45

FIG. 36



34/45

FIG. 37

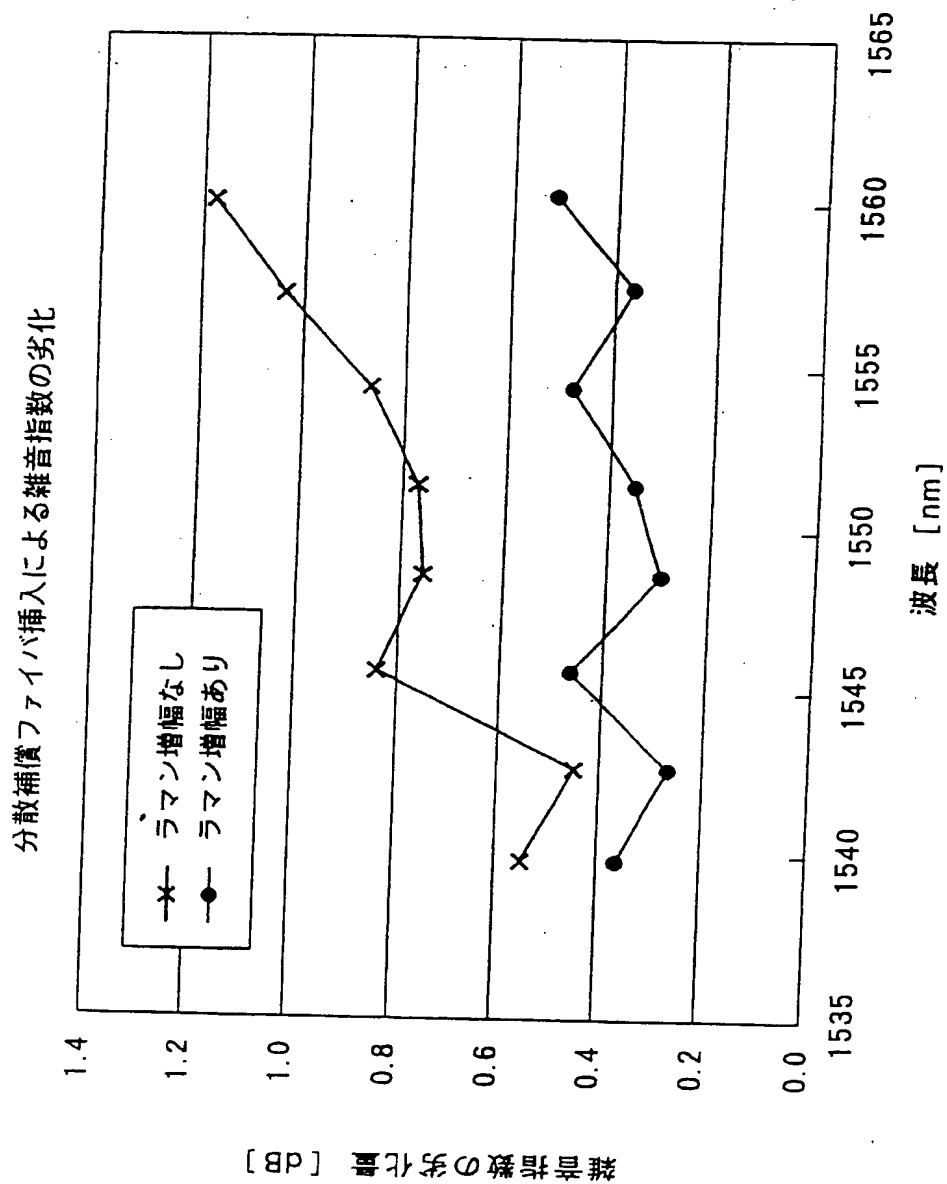
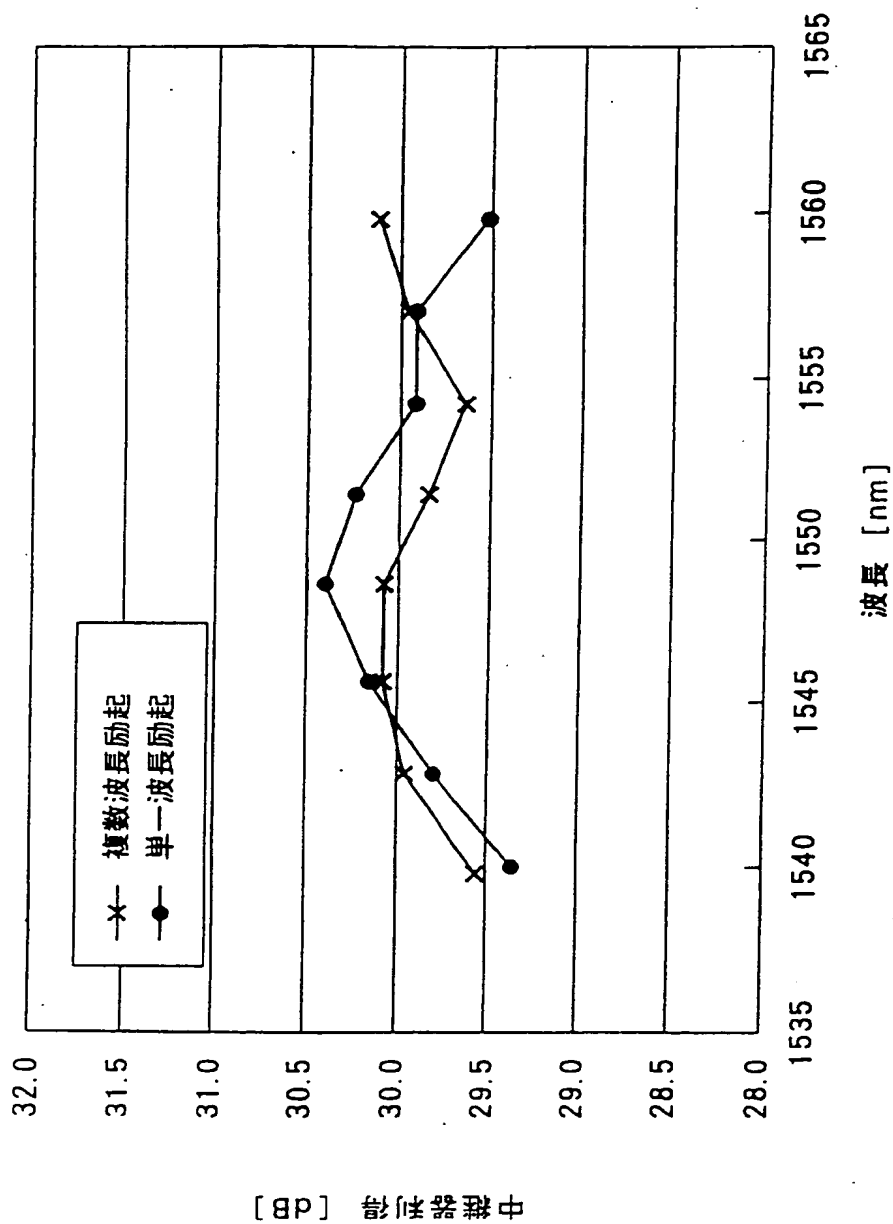


FIG. 38

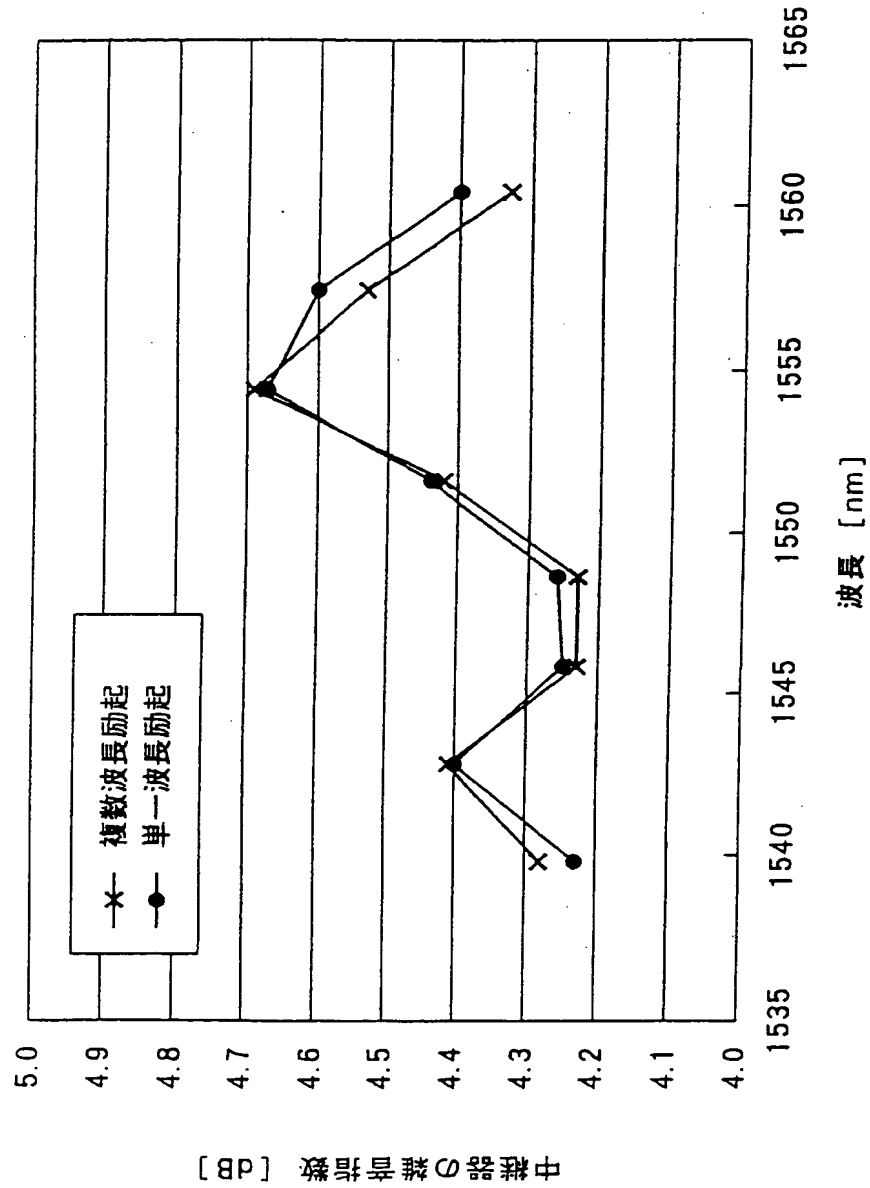
ラマン増幅器の励起波長数と中継器の特性



36 / 45

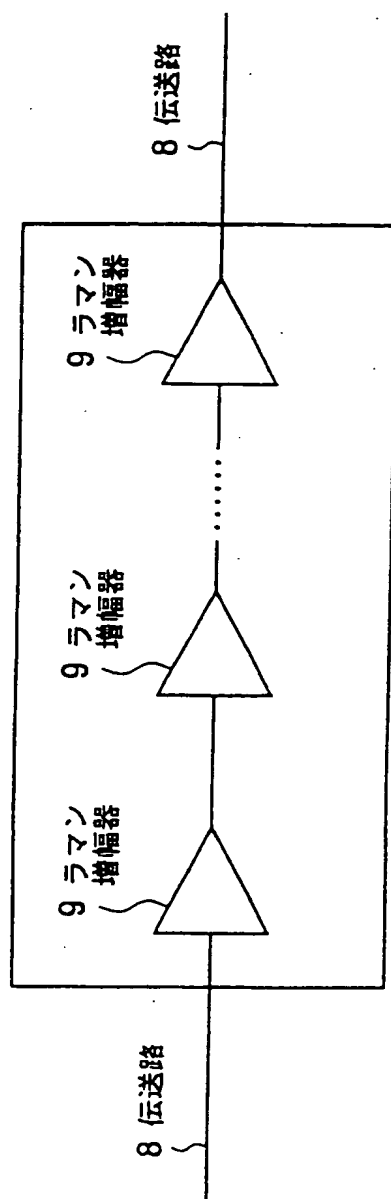
FIG. 39

ラマン増幅器の励起波長数と中継器の特性



37/45

FIG. 40



38/45

FIG. 41

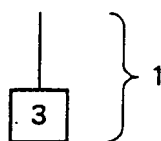
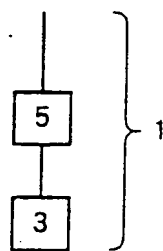


FIG. 42



39/45

FIG. 43

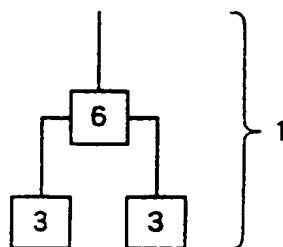


FIG. 44

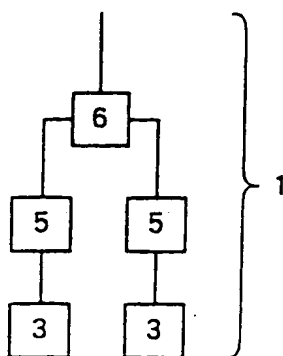


FIG. 45

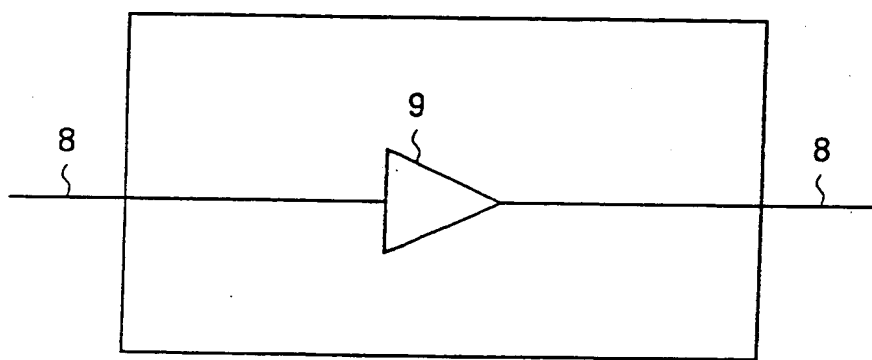


FIG. 46

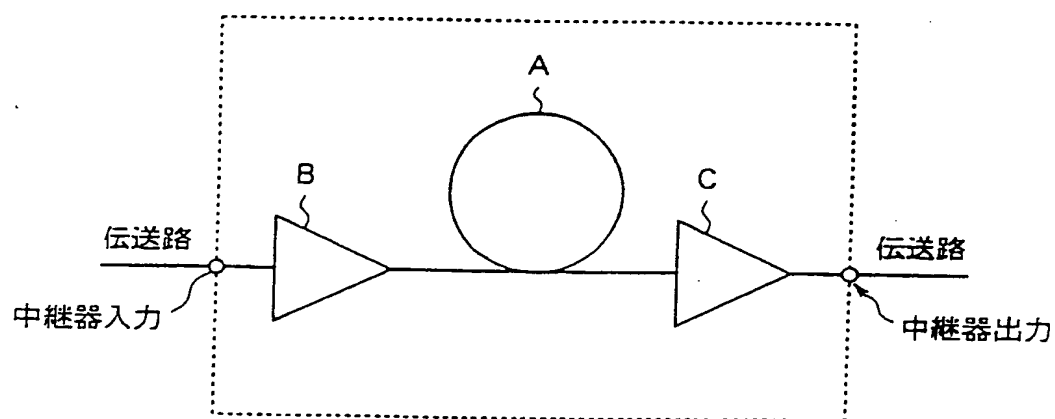
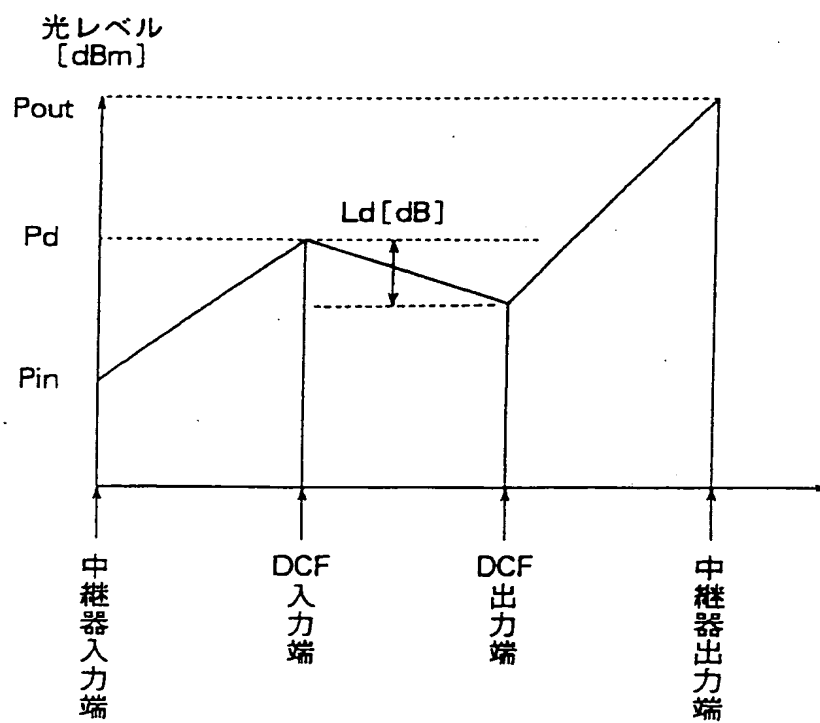


FIG. 47



43/45

FIG. 49

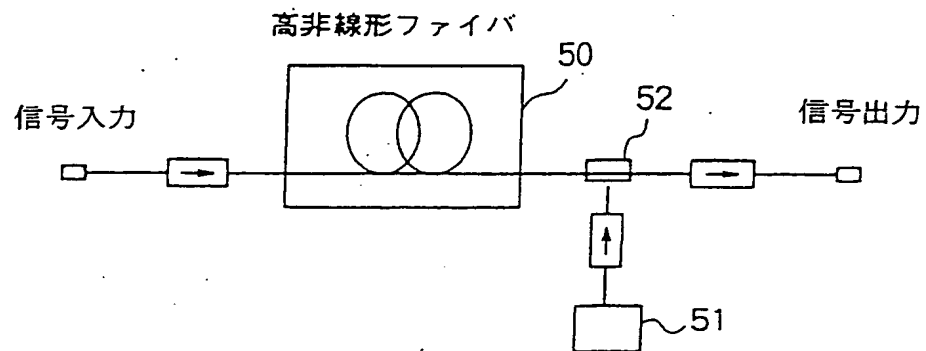
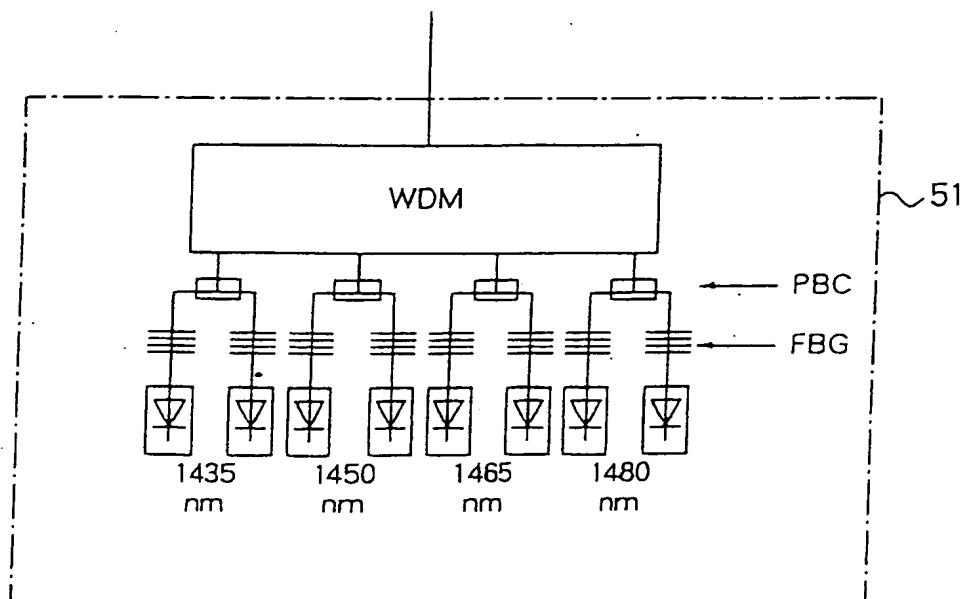


FIG. 50



44/45

FIG. 51

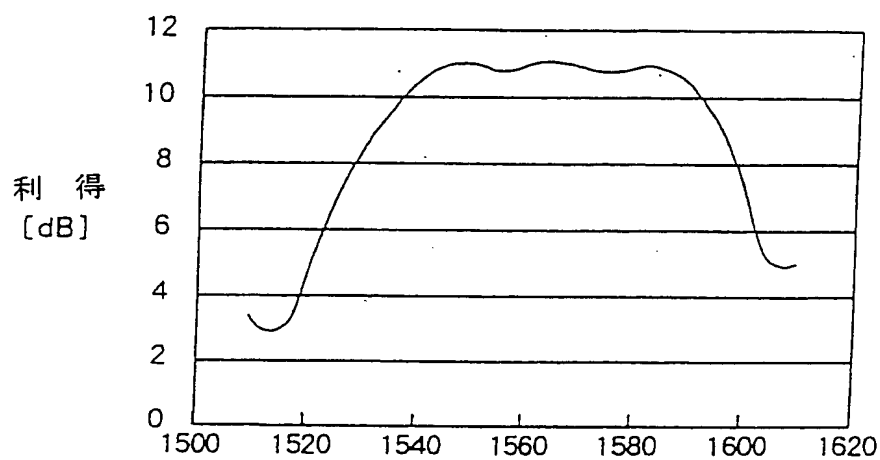
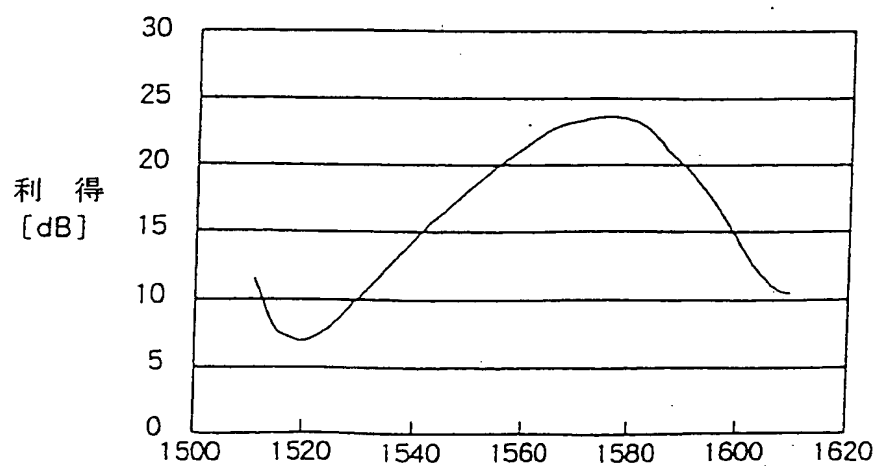
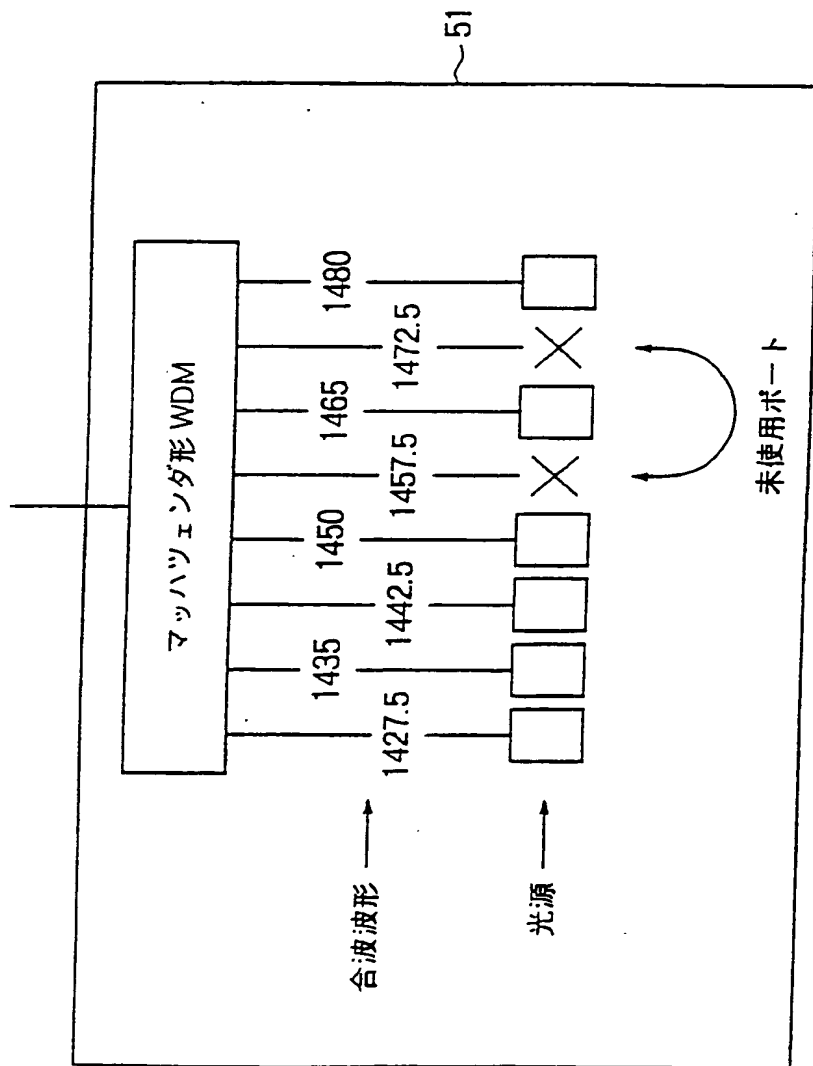


FIG. 52



45/45

FIG. 53



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP99/03944

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl.⁶ G02F1/35, H04B10/17

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.⁶ G02F1/35, G02B6/00, H01S3/30, H04B10/17, H01S3/10, H04B10/18

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-1999
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-1999 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-1999

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|------------------------------|
| X | JP, 60-236277, A (Polaroid Corp.), 25 November, 1985 (25. 11. 85) | 1, 5, 6, 8, 9, 13, 14, 16 |
| Y | & EP, 139081, A2 & US, 4616898, A | 2-4, 7, 10-12, 15 |
| A | & CA, 1231138, A1 & AU, 570950, B2 | 17-26, 29-31 |
| | & AT, 46413, E | |
| Y | JP, 9-120090, A (Fujitsu Ltd.), 6 May, 1997 (06. 05. 97) | 2, 3, 10, 11 |
| | & EP, 762569, A2 & US, 5745283, A | |
| Y | JP, 10-12951, A (Nippon Telegraph & Telephone Corp.), 16 January, 1998 (16. 01. 98), Par. No. [0004] ; Fig. 12 (Family: none) | 4, 12 |
| Y | JP, 9-179152, A (Fujitsu Ltd.), 11 July, 1997 (11. 07. 97) (Family: none) | 7, 15, 27, 28 17-26 |
| A | | |
| Y | JP, 9-331297, A (Kokusai Denshin Denwa Co., Ltd.), 22 December, 1997 (22. 12. 97) | 9-16, 27, 28 17-26 |
| A | & EP, 818895, A2 & US, 5808789, A | |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

| | |
|---|--|
| * Special categories of cited documents: | "I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention |
| "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance | "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone |
| "E" earlier document but published on or after the international filing date | "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art |
| "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) | "&" document member of the same patent family |
| "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means | |
| "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed | |

Date of the actual completion of the international search
16 September, 1999 (16. 09. 99)

Date of mailing of the international search report
28 September, 1999 (28. 09. 99)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl[°] G02F 1/35, H04B 10/17

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl[°] G02F 1/35 G02B 6/00
 H01S 3/30 H04B 10/17
 H01S 3/10 H04B 10/18

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-1999年
 日本国登録実用新案公報 1994-1999年
 日本国実用新案登録公報 1996-1999年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
|-----------------|--|---|
| X Y A | J P, 60-236277, A (ポラロイドコーポレーション) 2 5. 11月. 1985 (25. 11. 85) & EP, 139081, A2 & US, 4616898, A & CA, 1231138, A1 & AU, 570950, B2 & AT, 46413, E | 1, 5, 6, 8, 9, 13 , 14, 16 2-4, 7, 10-12, 15 17-26, 29-31 |
| Y | J P, 9-120090, A (富士通株式会社) 6. 5月. 199 7 (06. 05. 97) & EP, 762569, A2 & US, 57 45283, A | 2, 3, 10, 11 |

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願


の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 16. 09. 99

国際調査報告の発送日 28.09.99

国際調査機関の名称及びあて先
 日本国特許庁 (ISA/J P)
 郵便番号 100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)
 津田 俊明 
 電話番号 03-3581-1101 内線 3293

2X 2912

| C (続き) . 関連すると認められる文献 | | |
|-----------------------|--|------------------------|
| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
| Y | JP, 10-12951, A (日本電信電話株式会社) 16. 1 月. 1998 (16. 01. 98), 【0004】段落、図12 (フ ァミリーなし) | 4, 12 |
| Y A | JP, 9-179152, A (富士通株式会社) 11. 7月. 19 97 (11. 07. 97) (ファミリーなし) | 7, 15, 27, 28 17-26 |
| Y A | JP, 9-331297, A (国際電信電話株式会社) 22. 12 月. 1997 (22. 12. 97) & EP, 818895, A2 & US, 5808789, A | 9-16, 27, 28 17-26 |

DESCRIPTION

RAMAN AMPLIFIER, OPTICAL REPEATER USING THE SAME, AND RAMAN AMPLIFICATION METHOD

5

Technical Field

The present invention relates to a Raman amplifier that can be used to amplify signal lights of light in various light communications systems, an optical repeater using the Raman amplifier, and a Raman amplification method. The present invention is suitable especially for the amplification of wavelength division multiplex light.

Background Art

Most optical amplifiers used in the present optical fiber communications system are rare-earth-doped fiber amplifiers. Especially, an Er-doped optical fiber amplifier (hereinafter referred to as EDFA) that uses a fiber doped with erbium is often used. However, the practical gain wavelength range of the EDFA is from about 1530 nm to 1610 nm (reference document: Electron. Lett, Vol.33, No.23, pp.1967-1968). Additionally, the gain of the EDFA depends on wavelengths, and, when the EDFA is used for wavelength division multiplex light, a difference arises in the gain depending on the wavelength of a signal light of light. Fig. 23 shows an example of the wavelength dependence of an EDFA gain, in which variations in the gain are great especially in wavelengths of less than 1540 nm and more than 1560 nm. Therefore, a gain-flattening filter is used in order to obtain a constant gain (in most cases, within 1 dB in gain deviation) in the entire range that includes such wavelengths.

The gain-flattening filter is a filter designed so that a loss becomes great in wavelengths where a gain is great, and a loss profile has almost the same shape as a gain profile. However, in the EDFA, the gain profile changes such as curves a, b, and c shown in Fig. 24 in accordance with a change in the magnitude of an average gain, and therefore an optimum loss profile of the gain-flattening filter also changes in this case. Therefore, if flattening has been realized by a gain-correcting filter in which a loss profile

is fixed, a flatness degree will deteriorate when the gain of the EDFA changes.

On the other hand, optical amplifiers include one that is called a "Raman amplifier" that utilizes the Raman scattering of an optical fiber (reference document: Nonlinear Fiber Optics, Academic Press). The Raman amplifier has a gain peak in a frequency of about 13 THz lower than the frequency of a pumping light. In the following description, "about 13 THz lower frequency" will be expressed as "about 100 nm longer wavelength" on the assumption that a pumping light in the 1400 nm range is used. Fig. 25 shows the wavelength dependence of a gain when a pumping light whose center wavelength is 1450 nm is used. At this time, a gain peak is 1550 nm, and a bandwidth within gain deviation 1 dB is about 20 nm. As long as a pumping light source can be prepared, the Raman amplifier can amplify an arbitrary wavelength, and therefore use in a wavelength range where amplification cannot be amplified by the EDFA has chiefly been examined. By contrast, the Raman amplifier is not used in the gain range of the EDFA. The reason is that the Raman amplifier needs very strong pumping light power in order to obtain a gain equal to that of the EDFA. In addition, if a pumping light having great power is entered into the fiber in order to improve the gain, noise will increase because of the occurrence of induced Brillouin scattering caused by the pumping light, thus making use of the Raman amplifier difficult. Japanese Unexamined Patent Publication No. Hei-2-12986 discloses an example of a technique for controlling the induced Brillouin scattering in a Raman amplifier.

The Raman amplifier also has polarization dependence in the gain, and exerts an amplification action only on a component coinciding with the polarization of a pumping light among polarization components included in a signal light. Therefore, a countermeasure is required to be taken for reducing the instability of the gain caused by the polarization dependence, and a possible solution thereto is either to use a fiber that preserves polarization planes as an amplifying fiber or to use a pumping light source having a random polarization state.

In addition to this, the Raman amplifier is required to

enlarge a gain range, and a possible solution thereto is to use a plurality of pumping lights with different wavelengths (reference document: OFC98, PD-6). However, an approach has not yet been taken with the intention of reducing the gain deviation to less than 1 dB.

On the other hand, there is an optical repeater for simultaneously compensating a transmission loss and wavelength dispersion both of which arise in an optical fiber transmission line. This is constructed by combining an Er-doped fiber amplifier (EDFA) with a dispersion-compensating fiber (DCF) used to compensate wavelength dispersion. Fig. 46 shows this conventional example, in which a dispersion-compensating fiber "A" is disposed between two Er-doped fiber amplifiers "B" and "C". A first Er-doped fiber amplifier "B" amplifies a signal light from a low level to a relatively high level, and is characterized by being superior in noise characteristics. A second Er-doped fiber amplifier "C" amplifies an optical signal that has been attenuated in the dispersion compensating fiber "A" so as to again reach a high level, and is characterized by having a high output level.

Incidentally, the optical repeater must be appropriately set at a repeater input level, a repeater output level, and the amount of dispersion compensation (i.e., loss in the dispersion compensating fiber "A") when the optical repeater is designed, and there is a restrictive item in the fact that the input light level of the dispersion compensating fiber "A" has an upper limit. The reason is that, if input power to the dispersion compensating fiber "A" is enhanced, the influence of a nonlinear effect in the dispersion-compensating fiber "A" becomes great, so that considerable deterioration occurs in a transmission waveform. The upper limit of the input power to the dispersion compensating fiber "A" depends entirely on a self phase modulation effect (SPM effect) when transmitted with one wave, and depends entirely on a cross phase modulation effect (XPM effect) when transmitted with WDM. Accordingly, in the optical repeater, in consideration of some variation factors, a repeater that is excellent in the gain flatness degree and in noise characteristics must be designed under these conditions.

Fig. 47 shows a diagram of a light level in the interior of the repeater. A gain $G1$ [dB] of the first Er-doped fiber amplifier "B" is set at a difference between a repeater input level P_{in} [dB] and an input upper limit P_d [dB] to the dispersion compensating fiber "A". A gain $G2$ [dB] of the second Er-doped fiber amplifier "C" is set at $G_r + L_d - G1$ [dB] based on a loss L_d [dB] in the dispersion compensating fiber "A", a repeater gain G_r [dB], and a gain $G1$ [dB] of the first Er-doped fiber amplifier "B". Since the design parameters are different in each system, $G1$ [dB] and $G2$ [dB] are different in each system, and therefore the Er-doped fiber amplifiers "B" and "C" must be re-designed in each system. Noise characteristics in these systems have a deep relationship with the loss L_d [dB] in the dispersion-compensating fiber "A", and it is known that the noise characteristics worsen as the loss becomes greater. Further, at present, unevenness in loss in a transmission line or in loss in the dispersion compensating fiber "A" is compensated by changing the gain of the Er-doped fiber amplifier "B" or "C", or is adjusted by separately providing a variable attenuator or the like. However, the former worsens the gain flatness degree, and the latter worsens the noise characteristics, and therefore they have both merits and demerits.

The Er-doped optical fiber amplifier also has some problems though it has widespread use in fiber optics communications. The Raman amplifier also has some problems. For example, the output of a general semiconductor laser is about 100 to about 200 mW, so that a gain to be obtained is relatively small; the gain is sensitive to the power of a pumping light or to variations in wavelengths, and, if a Fabry-Perot type semiconductor laser having relatively high output power is used, a noise resulting from gain variations caused by its mode hop will pronouncedly occur; and there is a need to change the driving current of a pumped laser when the magnitude of the gain is adjusted, and a variation in the center wavelength occurring when the driving current is changed is about 15 nm at its maximum, thus greatly changing the wavelength dependence of the gain. Further, disadvantageously, the shift of the center wavelength leads to variations in the coupling loss of a WDM coupler that multiplexes a pumping light. Further, disadvantageously,

also in the optical repeater, there is a need to re-design the Er-doped fiber amplifiers "B" and "C" in each system. Further, disadvantageously, a deterioration in noise characteristics caused by the insertion of the dispersion compensating fiber is an avoidable problem in the current methods being performed.

In a Raman amplification method in which a signal light is amplified by use of an induced Raman scattering phenomenon, an optical fiber for communications is used as an optical fiber serving as an amplifying medium. In a distribution type amplification method, the wavelength of a pumping light and the wavelength of a signal light are arranged in the 1400 nm - 1600 nm range where the loss is low and the wavelength dependence is small in a loss characteristic in a wide-band of the transmission optical fiber. In this case, the wavelength dependence loss of the optical fiber serving as an amplifying medium is about 0.2 dB/km or less, which is expressed as a difference between maximum and minimum values, in the aforementioned range, even if consideration is given to the loss resulting from OH with a peak of 1380 nm. Further, in this case, the amplification strength of the signal light amplified by each pumping light is almost equal, and therefore no special problem occurs in communications, even if differences are not given to the strength of each pumping light by use of a wavelength multiplex excitation method.

However, when the Raman amplification method is employed with an amplification unit like an EDFA (i.e., rare-earth-doped fiber amplifier), a fiber length of about 10 km to several ten kilometers is needed to obtain a necessary gain, and a problem concerning the storage of the optical fiber arises. Therefore it is preferable to shorten it as much as possible. Although the fiber length can be shortened by using a nonlinear, large optical fiber, the nonlinear, large optical fiber has difficulty decreasing the transmission loss generally resulting from OH of the 1380 nm band, and the Rayleigh scattering coefficient thereof becomes much greater than that of the transmission fiber. As a result, the difference between maximum and minimum values of the fiber loss in the aforementioned wavelength range reaches 1.5-10 dB/km, which is a very large value. This means that a loss difference caused

by the wavelength of the pumping light is 4.5 to 30 dB when the optical fiber serving as an amplifying medium is used for 3 km, and therefore it is impossible to uniformly amplify wavelength multiplex signal lights by a pumping light having equal strength.

5

Disclosure of Invention

An object of the present invention is to provide a Raman amplification method that is capable of uniformly amplifying wavelength multiplex light and that is suitable for unitization.

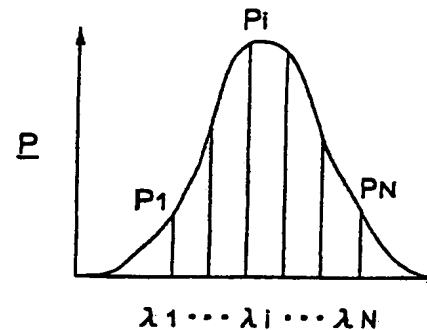
10 Another object of the present invention is to provide a Raman amplifier capable of obtaining a necessary gain, capable of reducing the wavelength dependence of a gain to such an extent that there is no need to use a gain-flattening filter, and usable even in the range of an EDFA. Still another object of the present
15 invention is to apply the aforementioned Raman amplifier to an optical repeater made up of an Er-doped fiber amplifier (EDFA) and a dispersion compensating optical fiber (DCF), and thereby provide an optical repeater capable of compensating the unevenness of a transmission line loss or a DCF loss without redesigning the EDFA
20 in each system and without causing deterioration in the characteristics of the optical repeater. The Raman-amplification of the DCF shows that the deterioration of noise characteristics resulting from the DCF insertion, which has conventionally been unavoidable, can be reduced.

25 Examples of the Raman amplifier structure of the present invention are shown in Figs. 1, 2, and 3. A relatively high gain can be obtained by using a small-sized Fabry-Perot type semiconductor laser 3 having relatively high output power as a pumping light producing means 1. Further, in the Fabry-Perot type
30 semiconductor laser 3, the line width of an oscillation wavelength is wide, and therefore the induced Brillouin scattering caused by pumping lights can be almost completely prevented from occurring. If a DBF type or DBR type semiconductor laser or MOPA is used as the pumping light producing means 1, gain shape never changes
35 according to driving conditions because the variation range of an oscillation wavelength is relatively small. Further, the occurrence of the induced Brillouin scattering can be controlled

by applying modulation.

Further, if the intervals of the center wavelengths of pumping lights are set to be 6 nm or more to 35 nm or less, the wavelength dependence of a gain can be reduced to such an extent as not to need a gain-flattening filter. The center wavelength λ_c mentioned here is a value defined for one pumping light, and is expressed by the following equation, where λ_i is a wavelength of an i -th longitudinal mode ($-th$ is a suffix used to form ordinal numbers) of laser oscillation, and P_i is optical power included in this mode.

$$\lambda_c = \frac{\sum_i P_i \lambda_i}{\sum_i P_i}$$



The reason why the center wavelength interval of a pumping light is set at 6 nm or more is that the oscillation bandwidth of the Fabry-Perot type semiconductor laser 3, to which an external resonator 5 whose reflection bandwidth is narrow is connected, is about 3 nm as shown in Fig. 12, and because some margins can be given to wavelength intervals between pumping lights so that a WDM coupler 11 (Figs. 1, 2, and 3) used to couple the pumping lights together can improve its coupling efficiency. In the WDM coupler 11 that has been designed so that lights whose wavelengths are different from each other can be received through each individual port, incident lights can be coupled together at one output port almost without allowing the incident lights to incur a loss, and the loss will become great with respect to a light with an intermediate wavelength of design wavelengths even if any one of the input ports is used. For example, a wavelength bandwidth where this loss becomes great was 3 nm in one WDM coupler 11. Therefore, in order to prevent the range of the semiconductor laser 3 from being included in this range, 6 nm resulting from addition of 3 nm to the bandwidth of the semiconductor laser 3 is suitable as

the lower limit of the center wavelength interval of the pumping light as shown in Fig. 12. On the other hand, if the center wavelength interval of the semiconductor laser 3 is set at 35 nm or more as shown Fig. 13A, a gain valley will appear in the middle of a Raman gain range obtained by pumping lights whose wavelengths
5 adjoin as shown in Fig. 13B, and, as a result, the gain flatness degree will worsen. This results from the fact that the gain is halved when separated from a gain peak wavelength by 15 nm to 20 nm, concerning the Raman gain obtained by one pumping light.
10 Therefore, the wavelength dependence of the gain can be reduced to such an extent as not to need a gain-flattening filter by setting the center wavelength interval of the pumping light at 6 nm or more to 35 nm or less.

In a Raman amplifier as recited in Claim 2 of the present
15 invention, a control means 4 is provided for monitoring input light or output light to the Raman amplifier, thereafter controlling each pumping light power of a pumping light producing means 1 on the basis of the result, and maintaining the output optical power of the Raman amplifier at a predetermined value, and therefore
20 constant output can be obtained independently of the variation of input signal power to the Raman amplifier or independently of the unevenness in the loss of a Raman amplifying fiber.

In a Raman amplifier as recited in Claim 3 of the present invention, an output light power control means 4 is provided for
25 flattening a Raman gain, and therefore a gain can be flattened. Especially, if wavelength light of a wavelength resulting from addition of about 100 nm to the wavelength of each pumping light as shown in Fig. 16 is monitored, and if the power of each pumping light is controlled to arrange the power of the wavelength lights,
30 a gain can be flattened. For a means to which a fiber grating (external resonator 5) for stabilizing wavelengths described later is connected, variation in the center wavelength caused by a change in a driving current is suppressed, and therefore it can also act as a means capable of controlling the gain.

35 In a Raman amplifier as recited in Claim 4 of the present invention, a control means 4 is provided for monitoring input signal power and output signal power, thereafter controlling pumping light

power so that the ratio between them becomes constant, and maintaining the gain of the Raman amplifier at a predetermined value, and therefore a constant gain can be obtained independently of the variation of input signal power to the Raman amplifier or
5 independently of the unevenness in the loss of a Raman amplifying fiber.

In a Raman amplifier as recited in Claim 5 of the present invention, an optical fiber 2 whose nonlinear refractive index n_2 is $3.5E-20[m^2/W]$ or more is used, and therefore a sufficient
10 amplification effect can be obtained though it is a result of previous studies.

In a Raman amplifier as recited in Claim 6 of the present invention, the optical fiber 2 serves as a part of a transmission fiber for propagating a signal light, and therefore the amplifier
15 can be constructed as a transmission optical fiber without any modifications.

In a Raman amplifier as recited in Claim 7 of the present invention, a part of dispersion managed transmission lines is used, and the amplifier can be constructed as an amplifying medium without
20 any modifications.

In a Raman amplifier as recited in Claim 8 of the present invention, the optical fiber 2 serves as a Raman amplifying fiber that is independent of a transmission fiber for propagating signal lights and that is inserted into this transmission fiber, and
25 therefore it is easy to use an optical fiber suitable for Raman amplification as the optical fiber 2 or use a wavelength dispersion compensating fiber, and it is possible to construct a centralized amplifier.

Since the optical repeater of the present invention
30 compensates the loss of the optical fiber transmission line 8 by using the Raman amplifier, an optical repeater provided with the operation of the aforementioned Raman amplifier can be obtained.

Among the optical repeaters of the present invention, the one provided with a rare-earth-doped fiber amplifier 9 at a stage
35 ahead of the Raman amplifier, or at a stage behind it, or at both stages compensates the loss of the optical fiber transmission line 8 by the Raman amplifier 9 and the rare-earth-doped fiber amplifier

10, and therefore desired amplification characteristics suitable for various transmission systems can be obtained.

In the optical repeaters of the present invention, one adaptive to various systems can be obtained according to the structure in which the Raman amplifier 9 and the rare-earth-doped fiber amplifier 10 are incorporated. This will be hereinafter described, taking an example in which a DCF is used as the amplifying fiber of the Raman amplifier 9. Fig. 17 shows an example of design parameters of a conventional optical repeater, in which G1 and G2 are different in each system. The repeater input and the DCF loss are inevitably varied because of the unevenness in intervals of the repeaters or because of the differences of the DCFs. This variation leads directly to the gain variation of the EDFA, and the gain variation leads to deterioration in the flatness degree. Fig. 18 typically shows the relationship between an EDFA gain and a flatness degree. The flatness degree is optimized by limiting a use range and an average gain, and therefore, when the average gain deviates from an optimized point, the wavelength dependence of the gain varies, and the flatness degree deteriorates. In order to avoid deterioration in the flatness degree, the EDFA gain must be maintained constant. Conventionally, a variable attenuator has been used as a means for compensating variations in the input level or in the DCF loss. Fig. 19A shows an example in which an attenuation of the variable attenuator is adjusted in accordance with a variation in the input level so as to maintain the input level to the DCF constant, and Fig. 19B shows an example in which an attenuation is adjusted in accordance with a variation in the DCF loss so as to control an intermediate loss to become constant. In both examples, the two EDFAs are constant in the gain. However, since a useless loss is added by the use of the variable attenuator under this method, a disadvantage arises in noise characteristics. According to the present invention, the EDFA gain is maintained constant by compensating a change in the design parameters of the repeater by the Raman amplification effect of the DCF so as to remove the necessity to design the EDFA in each system, and the unevenness in the repeater interval or the differences in the DCFs can be compensated without sacrificing both the flatness degree and the

noise characteristics. Unlike the repeater specifications of Fig. 17, Fig. 20 shows design values of the EDFA when the Raman amplification effect of the DCF is applied. EDFA characteristics required for three specifications can be made common by appropriately selecting a Raman gain of the DCF. As shown in Figs. 21A and 21B, the variation in the input level or in the DCF loss can be compensated by varying the Raman gain without varying the EDFA gain. In any case, the Raman amplification gain is adjusted so that the output level of the DCF becomes constant, while maintaining the EDFA gain constant. Further, compensation for the loss of the DCF itself by the Raman amplification makes it possible to reduce deterioration in noise characteristics resulting from the DCF insertion, which has been conventionally unavoidable. Fig. 37 shows measurement values of the amount of deterioration in noise factors when use is made of a Raman amplifier that uses the same DCF as the amount of deterioration in noise factors when the DCF is inserted.

In the optical repeaters of the present invention, one that is provided with a Raman amplifier using a pumping light source that does not perform wavelength coupling is narrow in working area, but is simple in structure, and can obtain characteristics equal to those of the aforementioned optical repeaters except for the bandwidth, in comparison with an optical repeater provided with a Raman amplifier that has been pumped by a plurality of wavelengths. Fig. 38 and Fig. 39 show a measurement example of an optical repeater that uses a Raman amplifier pumped by a pumping light source that does not perform wavelength coupling, and a measurement example of an optical repeater that uses a Raman amplifier pumped by a plurality of wavelengths, respectively.

In the Raman amplifier of the present invention, if the difference between maximum and minimum values of the center wavelength of a pumping light is within 100 nm, the wavelength of the pumping light and that of a signal light are prevented from being overlapped, and the waveform deterioration in the signal light can be prevented. If the wavelength of the pumping light is close to that of the signal light, waveform deterioration in the signal light occurs, and therefore the wavelength of the pumping

light and that of the signal light must be selected so as not to overlap each other. If the pumping light is in the 1.4 μm range, and if the difference between maximum and minimum values of the center wavelength of the pumping light is less than 100 nm, the overlapping of the wavelength of the pumping light with that of the signal light can be prevented, because the difference between the center wavelength of a gain resulting from one pumping light and the wavelength of the pumping light is about 100 nm as shown in Fig. 14.

10 In the Raman amplifier of the present invention, if pumping lights with adjoining wavelengths are propagated in two mutually different directions through the optical fiber 2 so as to pump a signal light bidirectionally, wavelength characteristics required of the WDM coupler 11 shown in Fig. 1, Fig. 2, and Fig. 3 can be relaxed. As shown in Fig. 15, in all pumping lights including bidirectional ones, the center wavelength is specified as λ_1 , λ_2 , λ_3 , and λ_4 , in which the interval is 6 nm or more to 35 nm or less. Concerning the mono-directional pumping light alone, the center wavelength is specified as λ_1 and λ_3 , or λ_2 and λ_4 , in which the wavelength interval is doubled. Therefore, margins cannot be given to the required characteristics of the WDM coupler 11.

In the Raman amplifier of the present invention, if the external resonator 5, such as a fiber grating, for stabilizing wavelengths is provided at the output side of the Fabry-Perot type semiconductor laser 3, it is possible to prevent noise caused by gain variations resulting from the mode hop of the Fabry-Perot type semiconductor laser 3. Further, if the external resonator 5 for stabilizing wavelengths is connected to the semiconductor laser 3, a bandwidth will be narrowed in the case of one pumping light source. However, since the wavelength interval can be narrowed when wavelength coupling is performed by the WDM coupler 11 (Figs. 1, 2, and 3), a more powerful, wideband pumping light can be finally obtained.

In the amplifier of the present invention, if the pumping light of the semiconductor laser 3 is used while performing polarization synthesis for each wavelength, the polarization dependence of a gain is removed, and, at the same time, the pumping

light power to be entered into the optical fiber 2 can be increased. A component by which a gain can be obtained in Raman amplification is only one that coincides with the polarization of the pumping light, and therefore, if the pumping light is linear polarization and, at the same time, the amplifying fiber is not a polarization-maintaining fiber, the gain will be varied according to a variation in the relative polarization of the signal light and the pumping light. However, synthesis that has been achieved so that the polarization plane can orthogonally cross the pumping light source of the linear polarization makes it possible to remove the polarization dependence of the gain, and, simultaneously, makes it possible to increase the pumping light power entered into the fiber.

In the Raman amplifier of the present invention, if a planar light wave circuit type wavelength-coupling device on the principle of the Mach-Zehnder interferometer is used as a means for coupling the Fabry-Perot type, the DFB type, or the DBR type semiconductor lasers with a plurality of wavelengths, or the MOPAs, coupling can be performed at an extremely low loss even when many Fabry-Perot type semiconductor lasers with a plurality of wavelengths are combined, and a high-output pumping light can be obtained.

In the Raman amplifier of the present invention, if a polarization-plane-rotating means 7 for rotating the polarization plane by 90 degrees is provided as shown in Fig. 6, and if a plurality of pumping lights produced by the pumping light producing means 1 and a pumping light whose polarization-plane is orthogonally crossed with those lights are designed to simultaneously exist in the optical fiber 2, an always constant gain can be fundamentally obtained independently of the polarization plane of the signal light. Since the range of the Raman amplification depends on the range of the pumping light, the pumping light entered into the optical fiber 2 for amplification can be turned into a wideband one by coupling the pumping lights with a plurality of wavelengths by means of the WDM coupler 11, and, as a result, the Raman gain becomes wideband.

In the optical repeater of the present invention, if a residual pumping light of the Raman amplifier is entered into the

optical fiber transmission line 8, and if the Raman amplification effect in the optical fiber transmission line 8 is used, a part of the loss of the optical fiber transmission line 8 can be compensated.

5 In the optical repeater of the present invention, if a residual pumping light of the Raman amplifier is used as a pumping light of the rare-earth-doped fiber amplifier 10, the number of semiconductor lasers to be used can be reduced.

10 In the optical repeater of the present invention, if a dispersion compensating fiber is used for the optical fiber 2 of the Raman amplifier 9, the wavelength dispersion of the optical fiber transmission line 8 can be compensated by this Raman amplifier 9, and a part of or all of the loss in the optical fiber transmission line 8 and in the amplifying fiber 2 can be compensated.

15 A Raman amplification method as recited in Claim 29 of the present invention is a Raman amplification method for propagating two or more pumping lights and signal lights having different center wavelengths through an optical fiber serving as a Raman-amplification medium and thereby Raman-amplifying the signal
20 lights, wherein the optical power of the pumping light is heightened proportionately with a reduction in the center wavelength thereof.

 A Raman amplification method as recited in Claim 30 of the present invention is a Raman amplification method for propagating two or more pumping lights and signal lights having different center
25 wavelengths through an optical fiber serving as a Raman-amplification medium and thereby Raman-amplifying the signal lights, wherein the total optical power of the pumping light on the wavelength side shorter than the intermediate between the shortest center wavelength and the longest center wavelength of
30 the two or more pumping lights is designed to be higher than the total optical power of the pumping light on the longer wavelength side.

 A Raman amplification method as recited in Claim 31 of the present invention is a Raman amplification method for propagating
35 three or more pumping lights and signal lights having different center wavelengths through an optical fiber serving as a Raman-amplification medium and thereby Raman-amplifying the

signal lights, wherein the number of pumping light sources having center wavelengths shorter than the intermediate between the shortest center wavelength and the longest center wavelength of the three or more pumping lights is designed to be larger than that of pumping light sources having center wavelengths longer than the intermediate, and the total optical power of the pumping light on the shorter wavelength side is designed to be greater than that of the pumping light on the longer wavelength side.

Brief Description of Drawings

Fig. 1 is a block diagram showing a first embodiment of the Raman amplifier of the present invention. Fig. 2 is a block diagram showing a second embodiment of the Raman amplifier of the present invention. Fig. 3 is a block diagram showing a third embodiment of the Raman amplifier of the present invention. Fig. 4 is a block diagram showing a first example of an output light power control means in the Raman amplifier of the present invention. Fig. 5 is a block diagram showing a second example of the output light power control means in the Raman amplifier of the present invention. Fig. 6A and Fig. 6B are block diagrams showing different examples of a polarization-plane-rotating means in the Raman amplifier of the present invention. Fig. 7 is a block diagram showing a first embodiment of the optical repeater of the present invention. Fig. 8 is a block diagram showing a second embodiment of the optical repeater of the present invention. Fig. 9 is a block diagram showing a third embodiment of the optical repeater of the present invention. Fig. 10 is a block diagram showing a fourth embodiment of the optical repeater of the present invention. Fig. 11 is a block diagram showing a fifth embodiment of the optical repeater of the present invention. Fig. 12 is an explanatory drawing explaining the reason to set the wavelength interval of a pumping light to be 6 nm or more. Fig. 13A and Fig. 13B are explanatory drawings explaining the reason to set the wavelength interval of the pumping light to be 35 nm or less. Fig. 14 is an explanatory drawing explaining the reason to set a difference between maximum and minimum wavelengths of the pumping light to be 100 nm or less. Fig. 15 is an explanatory drawing explaining an example of the

wavelength pattern of a pumping light in bidirectional pumping. Fig. 16 is an explanatory drawing explaining a situation in which pumping light power is controlled to flatten a band gain. Figs. 17A and 17B are explanatory drawings showing characteristics relevant to the design of an optical repeater. Fig. 18 is an explanatory drawing showing the relationship between gain variation and flatness deterioration in an EDFA. Fig. 19A is an explanatory drawing showing a situation of compensation for input level variation by a variable attenuator, and Fig. 19B is an explanatory drawing showing a situation of compensation for DCF loss variation by the variable attenuator. Figs. 20A and 20B are explanatory drawings showing characteristics relevant to the design of an optical repeater using a DCF Raman amplification effect. Fig. 21A is an explanatory drawing showing a situation of compensation for input level variation by the Raman amplification effect, and Fig. 21B is an explanatory drawing showing a situation of compensation for DCF loss variation by the Raman amplification effect. Fig. 22 is an explanatory drawing showing an example in which an output spectrum by the Raman amplifier is different. Fig. 23 is an explanatory drawing showing the wavelength dependence of a gain by the EDFA. Fig. 24 is an explanatory drawing showing gain variation by the EDFA. Fig. 25 is an explanatory drawing showing the wavelength dependence of the gain by the Raman amplification. Fig. 26 is a block diagram of a control method for monitoring input light and controlling output light power. Fig. 27 is a block diagram of a control method for monitoring output light and controlling output light power. Fig. 28 is a block diagram of a control method for monitoring input light and output light and controlling output light power. Fig. 29 is a block diagram showing a first example of a method for transmitting a residual pumping light of a Raman amplifier to an optical fiber transmission line so as to obtain a Raman gain. Fig. 30 is a block diagram showing a second example of the method for transmitting a residual pumping light of a Raman amplifier to an optical fiber transmission line so as to obtain a Raman gain. Fig. 31 is a block diagram showing a third example of the method for transmitting a residual pumping light of a Raman amplifier to an optical fiber transmission line

so as to obtain a Raman gain. Fig. 32 is a block diagram showing a fourth example of the method for transmitting a residual pumping light of a Raman amplifier to an optical fiber transmission line so as to obtain a Raman gain. Fig. 33 is a block diagram showing a first example of a method for using the residual pumping light of the Raman amplifier as a pumping light of the EDFA. Fig. 34 is a block diagram showing a second example of the method for using the residual pumping light of the Raman amplifier as a pumping light of the EDFA. Fig. 35 is a block diagram showing a third example of the method for using the residual pumping light of the Raman amplifier as a pumping light of the EDFA. Fig. 36 is a block diagram showing a fourth example of the method for using the residual pumping light of the Raman amplifier as a pumping light of the EDFA. Fig. 37 is an explanatory drawing showing a deterioration in a noise factor resulting from the insertion of the dispersion-compensating fiber. Fig. 38 is an explanatory drawing showing the number of pumping wavelengths of the Raman amplifier and characteristics of the repeater. Fig. 39 is an explanatory drawing showing the number of pumping wavelengths of the Raman amplifier and characteristics of the repeater. Fig. 40 is a block diagram of an optical repeater in which a plurality of Raman amplifiers are connected in multi-stage form. Fig. 41 is a block diagram showing an example of a pumping light producing means that includes a single pumping light source. Fig. 42 is a block diagram showing another example of the pumping light producing means that includes a single pumping light source. Fig. 43 is a block diagram showing an example of a pumping light producing means that includes two pumping light sources. Fig. 44 is a block diagram showing another example of the pumping light producing means that includes two pumping light sources. Fig. 45 is a block diagram of a Raman amplifier in which a dispersion-compensating fiber is used as an amplifying fiber. Fig. 46 is a block diagram showing an example of a conventional optical repeater. Fig. 47 is an explanatory drawing showing a light level diagram in the optical repeater of Fig. 46. Fig. 48 is a block diagram showing a case where a SMF and a fiber that has dispersion less than $-20/\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ are used as amplifying fibers. Fig. 49 is an explanatory drawing showing an example of a structure

for embodying the Raman amplification method of the present invention. Fig. 50 is an explanatory drawing showing the pumping light source of Fig. 49. Fig. 51 is a gain profile of an optical signal that has been Raman-amplified according to the Raman amplification method of the present invention. Fig. 52 is a gain profile of an optical signal that has been Raman-amplified according to a conventional method. Fig. 53 is an explanatory drawing showing another example of the structure for embodying the Raman amplification method of the present invention.

Modes for Carrying Out the Invention

(Embodiment 1 of Raman amplifier)

Fig. 1 shows a first embodiment of a Raman amplifier of the present invention. The Raman amplifier is made up of a signal light input fiber 12, an amplifying fiber (optical fiber) 2, a WDM coupler 13, a pumping light producing means 1, a monitor light distributing coupler 14, a monitor signal detection/LD control signal generation circuit 15, a signal light output fiber 16, and a polarization-independent isolator 25. Herein, the monitor light distributing coupler 14 and the monitor signal detection/LD control signal generation circuit 15 constitute an output light power control means 4.

The pumping light producing means 1 is made up of Fabry-Perot type semiconductor lasers 3 ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4$), wavelength-stabilizing fiber gratings (external resonators) 5 ($5_1, 5_2, 5_3, 5_4$), polarization-synthesizing couplers (polarization synthesizers) 6 ($6_1, 6_2$), and a WDM coupler 11. Herein, both the oscillation wavelengths of the semiconductor lasers 3_1 and 3_2 and the transmission wavelengths of the fiber gratings 5_1 and 5_2 are wavelength λ_1 , and both the center wavelengths of the semiconductor lasers 3_3 and 3_4 and the transmission wavelengths of the fiber gratings 5_3 and 5_4 are wavelength λ_2 , and the oscillation wavelengths of the semiconductor lasers $3_1, 3_2, 3_3$ and 3_4 are designed so that their center wavelengths are stabilized at λ_1 and λ_2 by the action of the wavelength-stabilizing fiber gratings $5_1, 5_2, 5_3$ and 5_4 . A wavelength interval between wavelength λ_1 and wavelength λ_2 is from 6 nm or more to 35 nm or less.

Pumping lights produced by the semiconductor lasers 3_1 , 3_2 , 3_3 , and 3_4 are subjected to polarization synthesis by the polarization-synthesizing coupler 6 for each of wavelength λ_1 and wavelength λ_2 , and the output light of each polarization-synthesizing coupler 6 is coupled by the WDM coupler 11, and is changed into the output light of the pumping light producing means 1. The semiconductor lasers 3 and the polarization-synthesizing couplers 6 are connected to each other through polarization-plane-conserving fibers 17 so as to obtain two pumping lights with mutually different polarization planes. The output light of the pumping light producing means 1 is combined with the amplifying fiber 2 by means of the WDM coupler 13. On the other hand, a signal light (wavelength division multiplex light) is entered into the amplifying fiber 2 through the signal light input fiber 12, thereafter is coupled with the pumping light of the pumping light producing means 1 and is Raman-amplified by the amplifying fiber 2, thereafter is passed through the WDM coupler 13, thereafter a part of the resultant light to be used as a monitor signal is divided by a monitor-light-dividing coupler 14, and the remaining light is output to a signal light output fiber 16. The monitor signal is monitored by the monitor signal detection/LD control signal generation circuit 15. This circuit 15 generates a signal to control the driving current of each semiconductor laser 3 so that a gain deviation in a signal wavelength range becomes small.

A special fiber suitable for Raman amplification, such as a fiber whose nonlinear refractive index n_2 is $3.5E-20$ [m²/W] or more, can be used as the amplifying fiber 2, or the signal input fiber 12 to which a signal light is input can be used as the amplifying fiber 2 without modification. As shown in Fig. 48, a RDF (Reverse Dispersion Fiber) having dispersion less than -20 ps/nm per km can be connected to the SMF, and thereby can be used as an amplifying fiber that serves also as a transmission line. (Generally, it is desirable to set the length of the RDF to be between almost the same and twice as long as the SMF, in order to have dispersion less than -20 ps/nm.) In this case, it is convenient to have such a structure that the pumping light for Raman amplification propagates from the RDF to the SMF. This Raman

amplifier can be adapted into a centralized Raman amplifier by designing the amplifying fiber 2 to be connectable and insertable to a transmission fiber independently of this transmission fiber, not shown, through which a signal light is transmitted, and by
5 incorporating the amplifying fiber 2, the pumping light producing means 1, the WDM coupler 13, the monitor-light-dividing coupler 14, and the monitor signal detection/LD control signal generation circuit 15 as a complete set.

Fig. 22 shows measurement results of an output spectrum in
10 the Raman amplifier of Fig. 1. Pumping light wavelengths λ_1 and λ_2 used in this measurement are 1435 nm and 1465 nm, respectively, and 8 signal lights are input at equal intervals from -20 dBm/ch 1540 nm to 1560 nm. The amplifying fiber 2 is a dispersion compensating fiber having a length of about 6 km, and the power
15 of the pumping light is adjusted to compensate for the loss of the dispersion compensating fiber while maintaining a deviation between channels within 0.5 dB.

(Embodiment 2 of Raman amplifier)

Fig. 2 shows a second embodiment of the Raman amplifier of
20 the present invention, in which the pumping light from the pumping light producing means 1 travels through the amplifying fiber 2 in the same direction as the signal light. In more detail, the WDM coupler 13 is disposed on the front side of the amplifying fiber 2, and the pumping light from the pumping light producing means
25 1 is transmitted from the front side (i.e., from the input terminal) to the rear side (i.e., to the output terminal) of the amplifying fiber 2 through the WDM coupler 13. In this structure, it is known that the noise characteristic of the signal light is superior to that in the structure of embodiment 1, because amplification is
30 performed before the attenuation of the signal starts. Additionally, it is known that the gain is smaller than that in the structure of embodiment 1.

(Embodiment 3 of Raman amplifier)

Fig. 3 shows a third embodiment of the Raman amplifier of
35 the present invention, in which the pumping light from the pumping light producing means 1 travels bidirectionally through the amplifying fiber 2. In more detail, the WDM couplers 13 are

disposed on the front and rear sides of the amplifying fiber 2, respectively, and the pumping lights, divided into two groups, from the pumping light producing means 1 are combined with the amplifying fiber 2 through each WDM coupler 13. The pumping light that has been input to the front WDM coupler 13 travels toward the rear side of the amplifying fiber 2, whereas the pumping light that has been input to the rear WDM coupler 13 travels toward the front side of the amplifying fiber 2.

In the pumping light producing means 1, the center wavelengths of the semiconductor lasers 3_1 and 3_2 that belong to a first group "A" and the semiconductor lasers 3_5 and 3_6 that belong to a second group "B" are the same, and the center wavelengths of the semiconductor lasers 3_3 and 3_4 that belong to the first group "A" and the semiconductor lasers 3_7 and 3_8 that belong to the second group "B" are the same. The fiber gratings 5_1 through 5_8 are designed to fit the center wavelength of the semiconductor laser 3 to which each of them is connected.

(Embodiment 4 of Raman amplifier)

In the embodiment of Fig. 3, modifications can be made such that the center wavelengths of the semiconductor lasers 3_1 and 3_2 that belong to the first group "A" are each λ_1 , the center wavelengths of the semiconductor lasers 3_3 and 3_4 that belong to the first group "A" are each λ_3 , the center wavelengths of the semiconductor lasers 3_5 and 3_6 that belong to the second group "B" are each λ_2 , and the center wavelengths of the semiconductor lasers 3_7 and 3_8 that belong to the second group "B" are each λ_4 , and thereby λ_1 , λ_2 , λ_3 , and λ_4 are changed into mutually adjoining wavelengths. Likewise, in this case, a center wavelength interval is from 10 nm or more to 30 nm or less, and a difference between the maximum center wavelength λ_4 and the minimum center wavelength λ_1 is 100 nm or less. According to this structure, margins can be given to the wavelength interval of the pumping lights coupled in the same group, and the performance required of the WDM coupler 4 can be loosened.

(Embodiment 5 of Raman amplifier)

Fig. 40 shows a fifth embodiment of the Raman amplifier of the present invention, in which some suitable ones are selected from the Raman amplifiers 9 described in the aforementioned

embodiments, and they are connected in multi-stage form. The Raman amplifiers 9 different in characteristics are appropriately selected according to a desired amplification characteristic or noise characteristic, and thereby characteristics that cannot be
5 obtained by a single-structure Raman amplifier 9 can be obtained.

In each embodiment described above, the output light power control means 4 can be constructed as shown in Fig. 4 or Fig. 5. In the structure of Fig. 4, the monitor signal detection/LD control signal generation circuit 15, which is made up of a wavelength
10 branching device 18, photo-electric conversion means (e.g., photodiodes) 19, and an LD control circuit 20, is connected to the monitor-light-dividing coupler 14 shown in Fig. 1 or Fig. 2 or Fig. 3. The wavelength branching device 18 branches the output light divided by the monitor-light-dividing coupler 14 into a plurality
15 of wavelength lights. In this case, light near the maximum amplification wavelength (wavelength resulting from addition of 100 nm to the pumping light wavelength) by each individual pumping light is branched. In more detail, wavelength light near 1530 nm and wavelength light near 1560 nm are branched, on the supposition
20 that the pumping wavelengths are 1430 nm and 1460 nm. The photo-electric conversion means 19 is used to convert received wavelength light into an electric signal, in which an output voltage varies in accordance with the magnitude of a received-light level. The LD control circuit 20 is used to change the driving current
25 of the semiconductor laser 3 in accordance with the output voltage from the photo-electric conversion means 19. The LD control circuit 20 calculates the output voltage from the photo-electric conversion means 19, and controls the semiconductor laser 3 so as to arrange the optical power of each wavelength light mentioned
30 above. That is, the output light power control means 4 removes the wavelength dependence of a Raman gain and flattens the gain.

Fig. 5 shows a structure in which the monitor signal detection/LD control signal generation circuit 15, which is made up of a branching coupler 21, band-pass filters 22, photo-electric
35 conversion means (e.g., photodiodes) 19, and an LD control circuit 20, is connected to the monitor-light-dividing coupler 14 shown in Fig. 1 or Fig. 2 or Fig. 3. The branching coupler 21 is used

to branch the output light divided by the monitor-light-dividing coupler 14 into lights identical in number to the pumping lights. The band-pass filters 22 are different from each other in the transmission center wavelength. In this example, light near the maximum amplification wavelength (wavelength resulting from addition of 100 nm to the pumping light wavelength) by each individual pumping light is transmitted. In more detail, wavelength light near 1530 nm and wavelength light near 1560 nm are transmitted, on the supposition that the pumping wavelengths are 1430 nm and 1460 nm. The photo-electric conversion means 19 is used to convert received wavelength light into an electric signal, in which an output voltage varies in accordance with the magnitude of a received-light level. The LD control circuit 20 is used to change the driving current of the semiconductor laser 3 in accordance with the output voltage from the photo-electric conversion means 19. The LD control circuit 20 calculates the output voltage from the photo-electric conversion means 19, and controls the semiconductor laser 3 so as to arrange the optical power of each wavelength light mentioned above. That is, the output light power control means 4 removes the wavelength dependence of a Raman gain and flattens the gain. Although the structures of Figs. 4 and 5 are constructed so as to monitor the output light as shown in Fig. 27, and thereby control the pumping light producing means 1, they can be constructed so as to monitor the input light as shown in Fig. 26, thereby controlling the pumping light producing means 1. Alternatively, they can be constructed so as to monitor both the output light and the input light as shown in Fig. 28, thereby controlling the pumping light producing means 1.

In each Raman amplifier constructed as above, a polarization-plane-rotating means 7 for rotating the polarization plane of a pumping light by 90 degrees as shown in Figs. 6A and 6B can also be provided instead of the polarization-synthesizing coupler 6 for synthesizing pumping lights, so that a plurality of pumping lights produced by the pumping light producing means 1 can coexist in the amplifying fiber 2 with pumping lights whose polarization planes are orthogonally crossed with the produced pumping lights. In Fig. 6A, a Faraday rotor 3₁ and a total

reflection mirror 3, are disposed at an end of the amplifying fiber 2, and the polarization plane of a pumping light propagated to the amplifying fiber 2 is rotated by 90 degrees, and thereby the pumping light returns to the amplifying fiber 2 again. This figure does not show a means for extracting a signal light, which has been propagated to the amplifying fiber 2 and has been Raman-amplified, from the fiber 2. In Fig. 6B, a PBS 33 and a polarization-plane-maintaining fiber 34 are provided at an end of the amplifying fiber 2, and the polarization plane of a pumping light output from the end of the amplifying fiber 2 is rotated by 90 degrees by the polarization-plane-maintaining fiber 34 whose main axis is twisted by 90 degrees and is connected, and thereby the pumping light is input to the end of the amplifying fiber 2 again through the PBS 33.

(Embodiment 1 of optical repeater)

Fig. 7 shows a first embodiment of an optical repeater constructed by employing the Raman amplifier of the present invention. The optical repeater shown here is to be inserted in the optical fiber transmission line 8 and to compensate a loss in this transmission line 8. In the optical repeater, a rare-earth-doped fiber amplifier 10 (hereinafter referred to as EDFA) is connected to the rear stage of a Raman amplifier 9, such as that shown in Fig. 1, 2, or 3. A signal light transmitted to the optical fiber transmission line 8 is input to the Raman amplifier 9 and is amplified, thereafter is input to the EDFA 10 and is amplified, and is output to the optical fiber transmission line 8. A gain may be controlled on the side of the Raman amplifier 9, or on the side of the EDFA 10, or on both sides. What is needed is to compensate the loss in the transmission line 8 as a whole. If the difference between the wavelength dependence of the gain of the EDFA 10 and the wavelength dependence of the Raman amplifier 9 can be properly adjusted, the wavelength dependence of the gain of the EDFA 10 can be reduced by the wavelength dependence of the Raman amplifier 9.

(Embodiment 2 of optical repeater)

Fig. 8 shows a second embodiment of the optical repeater constructed by employing the Raman amplifier of the present

invention. This optical repeater further has the EDFA 10 provided at the front stage of the Raman amplifier 9 in the optical repeater of Fig. 7. The EDFA 10 can be provided only at the front stage of the Raman amplifier 9.

5 (Embodiment 3 of optical repeater)

Fig. 9 shows a third embodiment of the optical repeater constructed by employing the Raman amplifier of the present invention, in which a Raman amplifier 9 that uses a dispersion compensating fiber (DCF) as the amplification fiber 2 is provided
10 between two EDFAs 10. A branching coupler 23 for branching the output light from the Raman amplifier 9 and a monitor signal detection/LD control signal generation circuit 24 for monitoring the branched light and controlling the gain of the Raman amplifier 9 are provided between the Raman amplifier 9 and the EDFA 10 placed
15 at the rear stage thereof. The monitor signal detection/LD control signal generation circuit 24 is such a control circuit as to be able to maintain the output power of the Raman amplifier 9 at a predetermined value. If the Raman amplifier 9 itself includes the output light power control means 4 shown in Figs. 4 and 5, the power
20 of output light is controlled to reach a predetermined value, and, at the same time, the power of pumping light is controlled so that a level deviation between a plurality of output signals becomes small.

In the optical repeater of Fig. 9, an output light level of
25 the Raman amplifier 9, i.e., an input light level to the second EDFA 10 is always maintained constant without the influence of a DCF loss or an output level of the first EDFA 10. This guarantees that the gain of the second EDFA 10 is maintained constant when the output of the repeater is prescribed. As a result, it is
30 possible to prevent the deterioration of the gain flatness of the second EDFA 10 resulting from, for example, a variation in the DCF loss. Further, if the first EDFA 10 is controlled to maintain a constant gain, a variation in the input to the repeater is compensated by a variation in the gain of the Raman amplifier 9.
35 In other words, the gain of the repeater is adjusted only by the gain of the Raman amplifier 9, and therefore the deterioration of a flatness degree caused by a variation in the gain of the EDFA

10 can be completely prevented.

(Embodiment 4 of optical repeater)

Fig. 10 shows a structure in which a control means for monitoring a light level and adjusting the gain of the Raman amplifier 9 is further provided between the first EDFA 10 and the Raman amplifier 9 in the embodiment of Fig. 9. Pumping light can be controlled by this means so that the level difference between the input and the output of the Raman amplifier 9 is maintained constant. This can compensate only fluctuations in the DCF loss.

10 (Embodiment 5 of optical repeater)

Fig. 11 shows a structure in which the gain-flattening monitor mechanism disposed in the Raman amplifier 9 of the aforementioned embodiment is moved to the output terminal of the repeater, and is used as a monitor for flattening the gain of the entire repeater. In this example, the first EDFA 10 and the second EDFA 10 may be used either for gain uniform control or for output uniform control. The power of each pumping light is individually controlled so that a level deviation between output signals in the repeater output becomes small.

20 (Embodiment 6 of optical repeater)

The optical repeater of the present invention can be constructed such that a dispersion compensating fiber is used for the amplifying fiber 2 of the Raman amplifier constructed as shown in Figs. 1 through 3, and thereby the wavelength dispersion of the optical fiber transmission line 8 is compensated, and a part of or all of the loss in the transmission line 8 and in the amplifying fiber 2 is compensated.

(Embodiment 7 of optical repeater)

Use can be made of an optical repeater that includes the Raman amplifier 9 using the pumping light producing means 1 shown in Figs. 41 through 44 in each embodiment of the aforementioned optical repeaters.

(Embodiment 8 of optical repeater)

As shown in Fig. 29 through Fig. 32, the WDM couplers 13 are inserted on the way to the amplifying fiber 2 of the Raman amplifier 9, and a residual pumping light from the pumping light producing means 1 to be propagated to the amplifying fiber 2 is entered into

the transmission line 8 through a WDM coupler 27 disposed in the transmission line 8 on the input side or on the output side of the Raman amplifier 9, thus making it possible to generate a Raman gain also in the transmission line 8. In Fig. 29 through Fig. 32, reference numeral 26 designates an optical isolator.
(Embodiment 9 of optical repeater)

If the optical repeater is made up of the Raman amplifier 9 and the EDFA 10 as shown in Fig. 33 through Fig. 36, the WDM couplers 13 are inserted on the way to the amplifying fiber 2 of the Raman amplifier 9, and a residual pumping light from the pumping light producing means 1 to be propagated to the amplifying fiber 2 is entered into the EDFA 10, thus making it possible to use the residual light as a pumping/auxiliary pumping light of the EDFA 10. Likewise, in Fig. 33 through Fig. 36, reference numeral 26 designates an optical isolator.
(Embodiment 1 of Raman amplification method)

Embodiments of a Raman amplification method of the present invention will be described in detail with reference to Fig. 49 through Fig. 52. In this embodiment, a highly nonlinear dispersion compensating fiber (DCF) is used as a Raman-amplification medium 50 of Fig. 49, and a pumping light oscillated from a pumping light source 51 is entered there by using a wave-combining device 52, and is transmitted. In this case, a 4chWDMLD unit, which is made up of four pumping light sources (semiconductor lasers), fiber black gratings (FBG), polarization synthesizers (PBC), and a WDM as shown in Fig. 50, is used as the pumping light source 51. The semiconductor lasers of Fig. 50 are different from each other in the center wavelength of an oscillated pumping light. Specifically, pumping lights whose center wavelengths are 1435 nm, 1450 nm, 1465 nm, and 1480 nm are oscillated. These pumping lights give the Raman gain to signal lights transmitted by the DCF, and amplify the signal lights. In this case, each pumping light has a gain peak in a frequency about 13 THz lower than that of the pumping light, i.e., a frequency about 100 nm longer than that of the pumping light.

In an example where a signal light of light of 1500 nm to 1600 nm is propagated from an end of a DCF with a length of 6 km

through this DCF, and pumping lights of 1400 nm, 1420 nm, 1440 nm, 1460 nm, and 1480 nm are entered into the DCF, and thereby the signal light is Raman-amplified, the input signal light and output signal light (i.e., Raman-amplified signal light) that has been output from an end of the DCF were examined, and the wavelengths and the total loss of the DCF were examined. Table 1 shows the relationship between the wavelengths and the total loss of the DCF. From this, it is apparent that wavelength dependence exists.

[Table 1]

| Wavelength (nm) | Unit loss (dB/km) | Total loss (dB) |
|-----------------|-------------------|-----------------|
| 1400 | 6.76 | 40.56 |
| 1420 | 3.28 | 19.68 |
| 1440 | 1.74 | 10.44 |
| 1460 | 1.16 | 6.96 |
| 1480 | 0.85 | 5.10 |
| 1500 | 0.69 | 4.14 |
| 1520 | 0.62 | 3.72 |
| 1540 | 0.57 | 3.42 |
| 1560 | 0.55 | 3.30 |
| 1580 | 0.54 | 3.24 |
| 1600 | 0.59 | 3.54 |

Herein, if the sum of a loss incurred by the semiconductor laser and a loss incurred by signal light that has been amplified by the semiconductor laser on the side of a wavelength longer by about 100 nm is regarded as an effective total loss, the relationship between the wavelengths and the effective total loss is shown as in Table 2.

[Table 2]

| Wavelength (nm) | Effective total loss (dB) |
|-----------------|---------------------------|
| 1400 | 40.56+4.14 44.7 |
| 1420 | 19.68+3.72 23.4 |
| 1440 | 10.44+3.42 13.86 |
| 1460 | 6.96+3.30 10.26 |
| 1480 | 5.10+3.24 8.34 |

The Raman amplification itself has almost no wavelength dependence. Therefore, if the amplification efficiency of each wavelength is considered as being influenced by this effective

total loss, each wavelength light can be almost uniformly Raman-amplified by adding this effective total loss to the output of the semiconductor laser needed for each desired amplification characteristic, and the wavelength dependence of the gain can be removed. Therefore, in this embodiment, the optical power of a pumping light is heightened proportionately with a reduction in the center wavelength of the pumping light.

(Embodiment 2 of Raman amplification method)

The Raman amplification method of this embodiment is a method for heightening the optical power of a pumping light of a wavelength shorter than the intermediate between the shortest center wavelength and the longest center wavelength among two or more pumping lights entered into the DCF, in order to almost uniformly Raman-amplify the signal light of 1500 nm to 1600 nm transmitted through the DCF. Specifically, the center wavelengths of pumping lights that are oscillated from the pumping light source 51 of Fig. 50 and are entered into the DCF are fixed at 1435 nm, 1450 nm, 1465 nm, and 1480 nm. The optical powers thereof are set as follows. That is, the powers of the pumping lights of 1435 nm and 1450 nm were heightened that are shorter than the center wavelength of 1457 nm which is intermediate between the center wavelength of 1435 nm which is the shortest and the center wavelength of 1480 nm which is the longest among the four pumping lights entered into the DCF.

Optical power of 1435 nm: 563 mW

Optical power of 1450 nm: 311 mW

Optical power of 1465 nm: 122 mW

Optical power of 1480 nm: 244 mW

As a result, concerning the gain profile obtained after the Raman amplification of the signal light of 1500 nm to 1600 nm transmitted through the DCF, the gain was about 11 dB, and the flatness degree was 1 dB from 1540 to 1590 nm as shown in Fig. 51. Accordingly, each wavelength light transmitted through the DCF was able to be almost uniformly Raman-amplified.

By the way, in a case where the center wavelengths of pumping lights oscillated from the pumping light source 51 and entered into the DCF are fixed at 1435 nm, 1450 nm, 1465 nm, and 1480 nm, and where the optical power of each pumping light is uniformly set at

563 mW, the gain profile obtained after the Raman amplification of the signal light of 1500 nm to 1600 nm transmitted through the DCF was shown as in Fig. 52. That is, the gain of about 24 dB was obtained near 1580 nm, but wideband gain flatness was not obtained (i.e., the loss waveform of the fiber is in a reversed state). (Embodiment 3 of Raman amplification method)

Fig. 53 shows a third embodiment of the Raman amplification method of the present invention. In the Raman amplification method of this figure, a wave-combining device on the principle of the Mach-Zehnder interferometer is used for combining pumping lights together, and the wavelengths of pumping lights capable of being combined have equal intervals. In this embodiment, some of the wavelengths capable of being combined are unused, and the number of wavelengths on the shorter wavelength side in the range of pumping lights is larger than that on the longer wavelength side. In this structure, if the powers of pumping lights of all wavelengths are made uniform, the total power of the pumping lights on the shorter wavelength side becomes greater than that on the longer wavelength side. This is the same as a case where the power on the shorter wavelength side is set to be greater than that on the longer wavelength side under the condition that the pumping lights are equally spaced out as in embodiment 2 described above. Therefore, the structure of Fig. 53 makes it possible to flatten a gain profile without allowing each individual pumping light to produce a great difference. This means that the total power of pumping lights capable of flattening a gain profile in a predetermined range can be heightened after determining the upper limit of output power from one pumping light, and means that the gain of the amplifier can be greatly taken.

Industrial Applicability

In the Raman amplifier of the present invention, it is possible to provide an optical amplifier capable of reducing the wavelength dependence of a gain to such an extent as not to need a gain-flattening filter and capable of maintaining flatness regardless of gain variations by selecting the wavelength of a pumping light source so that the center wavelength interval is from

6 nm or more to 35 nm or less and so that the difference between maximum and minimum values of center wavelengths is within 100 nm. It is also possible to apply this amplifier to an optical repeater for compensation for a loss in a transmission line and wavelength dispersion. In the repeater constructed by a combination with an EDFA, the input variations of the repeater or the gain variations of the EDFA caused by DCF loss variations can be suppressed, and thereby a deterioration of the gain flatness can be prevented, and the repeater can adjust to various systems.

According to the Raman amplification method of the present invention, the pumping light power is heightened proportionately with a reduction in the center wavelengths of two or more pumping lights entered into the DCF, or the pumping light power of a wavelength shorter than the intermediate between the shortest center wavelength and the longest center wavelength of two or more pumping lights entered into the DCF is heightened. Therefore, in either case, the wavelength multiplex light of about 1500 nm to about 1600 nm can be amplified at almost the same gain even if a highly nonlinear optical fiber is used. In other words, a necessary gain can be obtained with a short optical fiber by using a highly nonlinear optical fiber. Further, since the length of the optical fiber can be shortened, a Raman amplifier suitable for unitization can be provided.

CLAIMS

1. A Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and that combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, characterized in that the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less.

2. A Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and that combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, characterized in that the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the Raman amplifier further including output light power control means (4) for monitoring input light or output light, and, based on its result, controlling power of each pumping light of the pumping light producing means (1) so as to maintain output light power at a predetermined value.

3. A Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and that combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, characterized in that the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or

more to 35 nm or less, the Raman amplifier further including output light power control means (4) for monitoring output light, and, based on its result, controlling power of each pumping light of the pumping light producing means (1) so as to flatten wavelength dependence of amplifier output.

4. A Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and that combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, characterized in that the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the Raman amplifier further including output light power control means (4) for monitoring input light and output light power, and controlling power of each pumping light of the pumping light producing means (1) so as to make a ratio between the input light and the output light power constant and so as to maintain a gain at a predetermined value.

5. A Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and that combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, characterized in that the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and the optical fiber (2) for amplification has a nonlinear refractive index n_2 of $3.5E-20 [m^2/W]$ or more.

6. A Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and that combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through

an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, characterized in that the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and the optical fiber (2) for amplification exists as a part of a transmission line.

7. A Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and that combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, characterized in that the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and a SMF and a fiber having dispersion less than $-20/\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ are used as the optical fiber (2) for amplification.

8. A Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and that combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, characterized in that the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and the optical fiber (2) for amplification is independent of a transmission fiber for propagating a signal light, and exists as a fiber for Raman amplification that can be inserted into the transmission fiber.

9. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber

transmission line (8), comprises a Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the optical repeater compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by the Raman amplifier (9).

10. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8), comprises a Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the Raman amplifier further including output light power control means (4) for monitoring input light power or output light power, and, based on its result, controlling power of each pumping light of the pumping light producing means (1) so as to maintain output light power at a predetermined value, the optical repeater compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by the Raman amplifier (9).

11. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8), comprises a Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output

from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the Raman amplifier further including output light power control means (4) for monitoring output light, and, based on its result, controlling power of each pumping light of the pumping light producing means (1) so as to flatten wavelength dependence of amplifier output, the optical repeater compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by the Raman amplifier (9).

12. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8), comprises a Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the Raman amplifier further including output light power control means (4) for monitoring input light power and output light power, and controlling power of each pumping light of the pumping light producing means (1) so as to make a ratio between the input light power and the output light power constant and so as to maintain a gain at a predetermined value, the optical repeater compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by the Raman amplifier (9).

13. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8), comprises a Raman amplifier that includes

pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and the optical fiber (2) for amplification has a nonlinear refractive index n_2 of $3.5E-20[m^2/W]$ or more, the optical repeater compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by the Raman amplifier (9).

14. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8), comprises a Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and the optical fiber (2) for amplification exists as a part of a transmission line, the optical repeater compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by the Raman amplifier (9).

15. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8), comprises a Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1)

is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and a SMF and a fiber having dispersion less than $-20/\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ are used as the optical fiber (2) for amplification, the optical repeater compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by the Raman amplifier (9).

16. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8), comprises a Raman amplifier that includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and the optical fiber (2) for amplification is independent of a transmission fiber for propagating a signal light, and exists as a fiber for Raman amplification that can be inserted into the transmission fiber, the optical repeater compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by the Raman amplifier (9).

17. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by a Raman amplifier (9), wherein the Raman amplifier (9) includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof

are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the optical repeater including a rare-earth-doped fiber amplifier (10) at a front stage of, at a rear stage of, or at both the front and rear stages of the Raman amplifier (9).

18. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by a Raman amplifier (9), wherein the Raman amplifier (9) includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the Raman amplifier further including output light power control means (4) for monitoring input light or output light, and, based on its result, controlling power of each pumping light of the pumping light producing means (1) so as to maintain output light power at a predetermined value, the optical repeater including a rare-earth-doped fiber amplifier (10) at a front stage of, at a rear stage of, or at both the front and rear stages of the Raman amplifier (9).

19. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by a Raman amplifier (9), wherein the Raman amplifier (9) includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof

are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the Raman amplifier further including output light power control means (4) for monitoring output light, and, based on its result, controlling power of each pumping light of the pumping light producing means (1) so as to flatten wavelength dependence of amplifier output, the optical repeater including a rare-earth-doped fiber amplifier (10) at a front stage of, at a rear stage of, or at both the front and rear stages of the Raman amplifier (9).

20. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by a Raman amplifier (9), wherein the Raman amplifier (9) includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, the Raman amplifier further including output light power control means (4) for monitoring input light power and output light power, and controlling power of each pumping light of the pumping light producing means (1) so as to make a ratio between the input light power and the output light power constant and so as to maintain a gain at a predetermined value, the optical repeater including a rare-earth-doped fiber amplifier (10) at a front stage of, at a rear stage of, or at both the front and rear stages of the Raman amplifier (9).

21. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by a Raman amplifier (9), wherein the Raman amplifier (9) includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means

(1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and the optical fiber (2) for amplification has a nonlinear refractive index n_2 of $3.5 \times 10^{-20} [\text{m}^2/\text{W}]$ or more, the optical repeater including a rare-earth-doped fiber amplifier (10) at a front stage of, at a rear stage of, or at both the front and rear stages of the Raman amplifier (9).

22. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by a Raman amplifier (9), wherein the Raman amplifier (9) includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and the optical fiber (2) for amplification exists as a part of a transmission line, the optical repeater including a rare-earth-doped fiber amplifier (10) at a front stage of, at a rear stage of, or at both the front and rear stages of the Raman amplifier (9).

23. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by a Raman amplifier (9), wherein the Raman amplifier (9) includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping

light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and a SMF and a fiber having dispersion less than -20/ps/nm/km are used as the optical fiber (2) for amplification, the optical repeater including a rare-earth-doped fiber amplifier (10) at a front stage of, at a rear stage of, or at both the front and rear stages of the Raman amplifier (9).

24. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss in the optical fiber transmission line (8) by a Raman amplifier (9), wherein the Raman amplifier (9) includes pumping light producing means (1) for producing a plurality of pumping lights and combines the plurality of pumping lights output from the pumping light producing means (1) with a signal light propagated through an optical fiber (2) and thereby gives a Raman gain to the signal light, the pumping light producing means (1) is constructed with a Fabry-Perot type, a DFB type, or a DBR type semiconductor laser or with a MOPA (3), and the pumping lights are set so that center wavelengths thereof are different from each other and so that an interval between the center wavelengths is 6 nm or more to 35 nm or less, and the optical fiber (2) for amplification is made independent of a transmission fiber for propagating a signal light so as to be insertable into the transmission fiber, the optical repeater including a rare-earth-doped fiber amplifier (10) at a front stage of, at a rear stage of, or at both the front and rear stages of the Raman amplifier (9).

25. The optical repeater as recited in any one of Claims 17 through 24, wherein a gain of the rare-earth-doped fiber amplifier (10) is maintained constant, and a gain of the repeater is adjusted by a gain of the Raman amplifier (9).

26. The optical repeater as recited in any one of Claims 17 through 24, wherein a wavelength dependence of a gain of the rare-earth-doped fiber amplifier (10) is compensated by using a wavelength dependence of a gain of the Raman amplifier (9).

27. An optical repeater for being inserted into an optical fiber transmission line (8) and compensating a loss and wavelength dispersion in the optical fiber transmission line (8), comprises a Raman amplifier (9) using a pumping light that has not yet been subjected to wavelength coupling, and includes a rare-earth-doped fiber amplifier (10) provided at a front stage, or at a rear stage, or at both the front and rear stages of the Raman amplifier (9), and a dispersion compensating fiber is used for an optical fiber (2) for amplification of the Raman amplifier (9).

28. The optical repeater as recited in Claim 27, wherein a gain of the rare-earth-doped fiber amplifier (10) is maintained constant, and a gain of the repeater is adjusted by a gain of the Raman amplifier (9).

29. A Raman amplification method for propagating two or more pumping lights whose center wavelengths are different from each other and signal lights through an optical fiber serving as a Raman-amplification medium and for Raman-amplifying the signal lights, wherein optical power is heightened proportionately with a reduction in a center wavelength of pumping light.

30. A Raman amplification method for propagating two or more pumping lights whose center wavelengths are different from each other and signal lights through an optical fiber serving as a Raman-amplification medium and for Raman-amplifying the signal lights, wherein total optical power of pumping lights of wavelengths shorter than an intermediate between a shortest center wavelength and a longest center wavelength of two or more pumping lights is set to be greater than that of pumping lights of wavelengths longer than the intermediate.

31. A Raman amplification method for propagating three or more pumping lights whose center wavelengths are different from each other and signal lights through an optical fiber serving as a Raman-amplification medium and for Raman-amplifying the signal lights, wherein a number of pumping light sources having center wavelengths on the side of wavelengths shorter than the intermediate between a shortest center wavelength and a longest center wavelength of three or more pumping lights is larger than a number of pumping light sources having center wavelengths on the

side of wavelengths longer than the intermediate, and total optical power of the pumping lights on the shorter wavelength side is greater than that of the pumping lights on the longer wavelength side.

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

This Page Blank (uspto)